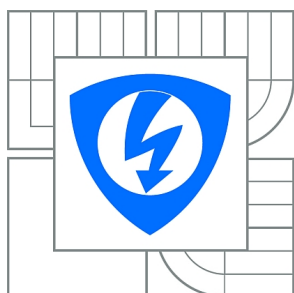




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ**
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

BEZDRÁTOVÁ MĚŘENÍ PRO DIAGNOSTIKU V DOPRAVĚ

DIAGNOSTIC SENSORS IN TRANSPORTATION SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LADISLAV TYLICH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ HYNČICA

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Ladislav Tylich

ID: 154899

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Bezdrátová měření pro diagnostiku v dopravě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vyvinout experimentální systém pro bezdrátový sběr diagnostických dat pro nákladní automobily, včetně analýzy možností využití alternativních zdrojů energie.

- 1) Seznamte se s problematikou rádiové komunikace a proveďte rešerši používaných rádiových standardů a modulů, vhodných pro komunikaci na krátké vzdálenosti.
- 2) Vytvořte programové vybavení pro obsluhu komunikačních modulů a pro ukládání měřených dat.
- 3) Vytvořte experimentální přípravek, který bude měřit parametry vibračního harvesteru energie a data bezdrátově odesílat.
- 4) Proveďte zpracování a vyhodnocení získaných dat.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

SLOSS, Andrew N, Dominic SYMES a Chris WRIGHT. ARM system developer's guide: designing and optimizing system software. Amsterdam: Elsevier, 2004, 689 s. ISBN 15-586-0874-5.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 25.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Hynčica

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem tohoto projektu je seznámit se se standardy bezdrátových sítí na krátké vzdálenosti a vytvoření přehledu dostupných rádií v pásmu (300-1000)MHz a jejich srovnání. K vybranému rádiovému modulu je vytvořena programová výbava. Hlavním úkolem je vytvoření přípravku k měření a ukládání parametrů vibračního harvesteru. Provedení měření na jejichž základě je provedeno vyhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

IEEE 802.15.4, RFM95W, mbed.org, přehled RF 300-1000MHz, ISM, energy harvesting, Mide V21BL, EH300A

ABSTRACT

The objective of this thesis is to get familiar with wireless networks standards and with standard IEEE 802.15.4. and communication principle in wireless sensor networks in short distances and create overview of RF chips in (300-1000)MHz with their comparison. To chosen transceiver modul create software. Main goal is to create module to measure and logging data from vibration harvester. Assessments based on measurements.

KEYWORDS

IEEE 802.15.4, RFM95W, mbed.org, summary RF chips 300-1000MHz, ISM, energy harvesting, Mide V21BL, EH300A

TYLICH, Ladislav *Bezdrátová měření pro diagnostiku v dopravě*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2014. 86 s. Vedoucí práce byl Ing. Ondřej Hynčica,

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Bezdrátová měření pro diagnostiku v dopravě“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Ondřeji Hynčicovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci, rodině za podporu, dále firmě FTL, a.s. za umožnění měření na autobusu a Ing. Miroslavu Uherovi za přístup do testovací laboratoře.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	11
1 Rádiové standardy	12
1.1 Sítě krátkého dosahu	12
1.1.1 IEEE 802.15.4	14
1.2 Sítě na velké vzdálenosti	16
1.2.1 LoRa	16
2 Přehled Low-Rate RF modulů¹	17
2.1 Orientace v přehledu	18
2.2 Semtech	18
2.3 Microchip	18
2.4 Silicon Labs	18
2.5 Texas Instruments	19
2.6 Další výrobci	19
2.6.1 Melexis	19
2.6.2 STMicroelectronics	20
2.6.3 MICREL Semiconductor	20
2.6.4 HOPE Microelectronics	20
2.6.5 Freescale a NXP	21
2.7 Shrnutí	21
3 Harvestery energie	22
3.1 Základní popis	22
3.2 Principy vibračních harvesterů energie	22
3.3 Použití	23
3.4 Další komponenty	23
4 Návrh řešení přípravku pro měření parametrů vibračního harvesteru energie	24
5 Řídicí jednotka a použité periferie	25
5.1 Rádiový modul RFM95W	25
5.1.1 Zapojení	26
5.1.2 Programování	27

¹Tato rádia (ne ale všechna) se dají použít pro standard IEEE 802.15.4 Žádné z nich ale není přímo specializované pro 802.15.4 - ta obsahují přímo předdefinované modulace i podporu MAC vrstvy.

5.1.3	Základní měření	30
5.1.4	Měření spotřeby v různých módech	33
5.2	Vývojová deska	33
5.2.1	Použití integrovaného akcelerometru	34
5.3	SD modul	38
5.4	Použité harvestery energie a obvody zpracování	39
5.4.1	Mide 509-V21BL	39
5.5	Výsledné uspořádání modulu	41
5.5.1	Použité napájení	42
6	Provedená měření a vyhodnocení	43
6.1	Vztahy a zákonitosti aplikované při srovnání	43
6.2	Referenční měření	43
6.3	Měření v dopravě	45
6.3.1	Sběr a způsob zpracování dat	45
6.3.2	Zhodnocení	47
6.3.3	Shrnutí harvesterů jako alternativních zdrojů energie	48
7	Závěr	51
	Literatura	52
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	55
	Seznam příloh	57
A	Přehled rádiových modulů	58
A.1	Semtech	58
A.2	Microchip	61
A.3	Silicon Labs	63
A.4	Texas Instruments	65
B	Naměřené hodnoty	67
B.1	Osobní automobil	67
B.2	Autobus	77

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Srovnání hlavních bezdrátových standardů [6]	13
1.2	Vrstvový model ISO/OSI pro standard ZigBee	14
1.3	Struktura datové jednotky fyzické vrstvy	15
3.1	Principiální schéma vibračního harvesteru využívajícího elektromagnetickou indukci [22]	22
3.2	Blokové schéma aplikace vibračního harvesteru energie	23
4.1	Blokové schéma přípravku pro měření parametrů vibračního harvesteru energie	24
5.1	Modul RFM95W při umístění na desce s SMA konektorem pro anténu	26
5.2	Blokové schéma propojení vývojové desky s rádiovým modulem	27
5.3	Schéma použitých knihoven	28
5.4	Blokové schéma algoritmu vysílače pro modul RFM95W	30
5.5	Blokové schéma přijímače při cyklickém výpisu dat	31
5.6	Základní měření rádiového modulu RFM95W při modulaci pro velké vzdálenosti LoRa.	34
5.7	Základní měření rádiového modulu RFM95W při modulaci FSK/GFSK v prostředí a).	35
5.8	Příklady spektrálních průběhů modulací RFM95W	36
5.9	Přehled funkcí jednotlivých pinů FRDMKL46Z [21].	38
5.10	Blokové schéma propojení SD modulu s FRDM-KL46Z.	39
5.11	Zápis dat z akcelerometru na SD kartu při ODR 400 Hz	40
5.12	Vibrační harvester Mide V21BL	40
5.13	Schéma pinů použitého obvodu EH300A	41
5.14	Výsledné uspořádání modulu pro záznam dat z harvesteru	42
6.1	Umístění přípravku ve vibrační komoře	44
6.2	Naměřený průběh zrychlení v ose vibrací při $f = 40 \text{ Hz}$, $a = 20 \text{ ms}^{-2}$	44
6.3	Porovnání průběhů nabíjení kapacitoru při různém zapojení harvesteru / $f = 30 \text{ Hz}$, $a = 20 \text{ ms}^{-2}$ / # je výkon dodávaný do kondenzátoru, # je průměrná energie, kterou byl kondenzátor nabíjen, # znázorňuje nabíjení kondenzátoru	45
6.4	Napěťové průběhy nabíjení kapacitoru při referenčních parametrech při paralelním spojení svorek harvesteru / # je výkon dodávaný do kondenzátoru, # je průměrná energie, kterou byl kondenzátor nabíjen, # znázorňuje nabíjení kondenzátoru	46
6.5	Umístění přípravku při měření	49
6.6	Průběhy nabíjení kondenzátoru při měření v dopravě	50
B.1	Přehled profilu zrychlení v x-ové ose.	68

B.2	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	69
B.3	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	70
B.4	Přehled profilu zrychlení v y-ové ose.	71
B.5	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	72
B.6	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	73
B.7	Přehled profilu zrychlení v z-ové ose.	74
B.8	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	75
B.9	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	76
B.10	Přehled profilu zrychlení v x-ové ose.	78
B.11	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	79
B.12	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	80
B.13	Přehled profilu zrychlení v y-ové ose.	81
B.14	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	82
B.15	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	83
B.16	Přehled profilu zrychlení v z-ové ose.	84
B.17	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	85
B.18	Grafické průběhy a FFT pole vzorků	86

SEZNAM TABULEK

1.1	Přehled frekvenčních pásem	15
2.1	Základní parametry obvodů výrobce Melexis [13].	19
2.2	Základní parametry obvodů výrobce STMicroelectronics [14].	20
2.3	Základní parametry obvodů výrobce NXP [17].	21
5.1	Parametry rádiového modulu RFM95W	25
5.2	Nastavení modulů pro měření při FSK/GFSK modulaci	32
5.3	Nastavení modulů pro měření při LoRa modulaci	33
5.4	Proudová spotřeba modulu RFM95W v FSK/GFSK módu	33
5.5	Proudová spotřeba modulu RFM95W v LoRa módu	37
5.6	Přehled parametrů akcelerometru MMA8451Q	37
5.7	Časové prodlevy ovladače akcelerometru při parametru ODR	37
5.8	Přehled nastvených parametrů akcelerometru MMA8451Q [29]	39
5.9	Přehled parametrů modulu EH300A [30]	41
5.10	Spotřeba jednotlivých řešení modulu	42
6.1	Informace o parametrech při referenčním měření při různém zapojení harvesteru	47
6.2	Informace o parametrech při měření v dopravě	48

ÚVOD

Cílem práce je vytvoření přípravku, který bude měřit parametry vibračního harvesteru energie a data bezdrátově odesílat.

V rámci bezdrátového přenosu je vytvořen přehled rádiích pracujících v ISM pásmech. Nejprve je proveden rozbor a vhodný výběr standardu. S ohledem na dostupné standardy (a použitelné v automobilové dopravě) je uveden přehled dostupných rádiových modulů pracujících na 315, 433, 868 a 915MHz od čtyř nejznámějších výrobců RF zařízení na trhu - Semtech, Microchip, Silicon Labs a Texas Instruments. Pro předložený rádiový modul je vytvořeno programové vybavení (s použitím dostupné knihovny) a provedeno základní měření. Dále jsou popsány principy harvesterů energie a jejich možnosti.

Na základě těchto informací je vytvořen návrh řešení výsledného modulu a následně popis použitých komponent (jejich nastavení, použité módy atp.). Vytvořeným modulem jsou provedena měření na harvesteru energie a MEMS akcelerometru a vyhodnocení naměřených dat. Je provedeno shrnutí harvesterů jako alternativních zdrojů energie.

1 RÁDIOVÉ STANDARDY

Pro zvolení správné koncepce bezdrátové komunikace v dopravě je nutné zvolit správný rádiový standard. IEEE (Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství - Institute of Electrical and Electronics Engineers) definuje standard 802, který specifikuje technologie fyzické vrstvy od Ethernetu po bezdrátová řešení. Je rozdělen na 22 částí [1]. Asi nejvíce známé bezdrátové standardy jsou:

- **802.11 Wi-Fi** - tento (původní) standard se rozrostl na rodinu standardů (802.11a, b, g, n, y, ac, ad a další odvozené) lišící se v pásmu a maximální rychlosti (802.11ad vydáno v r.2014 nabízí až 7000 Mbit/s, dnes je ovšem běžná rychlost 20 Mbit/s - uvažujme pro pozdější srovnání). Někde se uvádí jako bezdrátová technologie pro lokální síť - např. [2]. Používaná pásma 2,4 GHz, 5 GHz, 3,7 GHz (802.11y), 60 GHz(802.11ad).

Patří sem také **IEEE 802.11p**, který má význam právě v dopravě. Je označován jako WAVE [3] (Bezdrátová komunikace v dopravě - Wireless Access in Vehicular Environments) a jeho použití je primárně pro komunikaci mezi dopravními prostředky (poskytování vzájemných informací jako bezpečnostní varování nebo informace o provozu)

- **802.15 WPAN** - síť krátkého dosahu, Pásma 300 MHz - 915 MHz a 2,4 GHz. Rychlost v řádu stovek kbit/s. Někdy též označované WMN(Wireless Mesh Network).
- **802.16 WMAN** - označovány také jako WiMAX. Síť velkého dosahu. Opět se jedná o rodinu standardů (802.16a, c, b, d, m a další) lišící se různými vylepšeními. Pásmo 2 - 66 GHz dle standardu. Dosah až 70 km. Rychlost až 134 Mbit/s.

Pro účely bezdrátové diagnostiky (tedy komunikace na krátké vzdálenosti) použijeme standard IEEE 802.15. Metropolitní síť není vhodná svým velkým pokrytím. WiFi se nehodí především pro naši konkrétní aplikaci (bezdrátový přenos dat ze snímačů do dílčí řídicí jednotky vozidla), WiFi bychom volili, pokud by se jednalo o „globálnější“ přenos dat - z řídicí jednotky vozidla do sítě sdílené dopravními prostředky (WAVE) s ITS(Inteligentní transportní systém - Intelligent transportation system) aplikacemi.

1.1 Síť krátkého dosahu

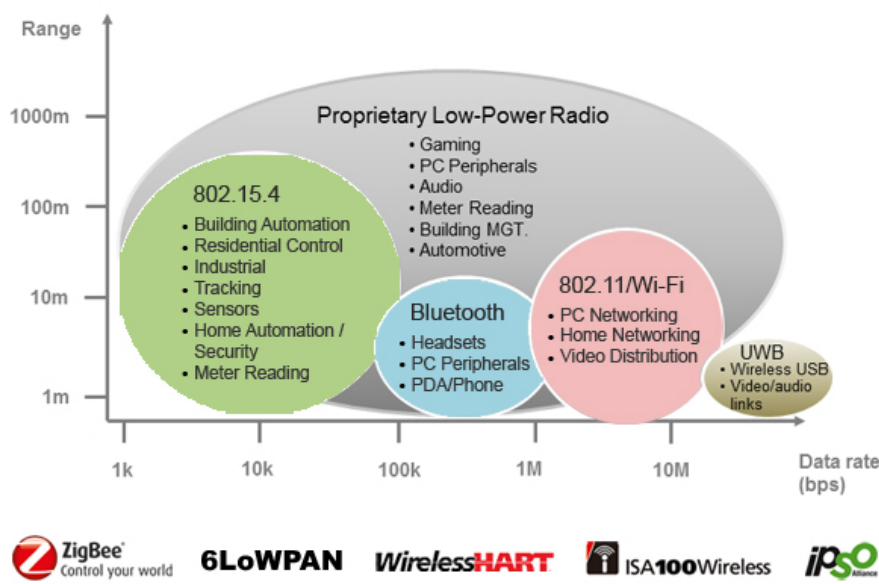
Jak bylo zmíněno, jedná se převážně o standard IEEE 802.15 . Ještě je třeba zdůraznit spojitost s pojmem WPAN (Bezdrátová „osobní“ síť - Wireless Personal Area Network). Síť slouží pro propojení zařízení v rámci určitého prostoru. WPAN pak používají technologie, které umožňují komunikace např. na 10 m. Následuje

popis jednotlivých standardů z rodiny IEEE 802.15:

- **802.15.1 Bluetooth** - dosah běžně kolem 10 m (podle třídy ale může být až 100 m). Používá pásmo 2,4 - 2,485 GHz. Rychlost 250 kbit/s.
- **802.15.3 UWB** - dosah jednotky m. Označováno také jako High Rate PAN, tedy vysokorychlostní síť. Dosah kolem 10 m. Velká šířka spektra. Pracuje ve stejném pásmu jako bluetooth (2,4 - 2,485 GHz), více kanálů pro zamezení kolizí s 802.11. Rychlost desítky Mbit/s.
- **802.15.4** - dosah od 10ti do 100 a více m (závislost na použití - venku/uvnitř, vysílacím výkonu atp.). Označovány jako Low Rate PAN (nízkoúrovňová síť) nebo také jako ZigBee (definuje vyšší vstvy). Tento standard využívá některá volně licencovaná pásma z ISM (Frekvence pro průmysl, vědecké a lékařské účely, bezlicenční pásma - Industrial, Scientific and Medical radio bands) portfolia. Využívá frekvence z rozsahu 314 MHz-2,5 GHz. Datová rychlost desítky kbit/s až 250 kbit/s.

Dále lze zmínit IEEE 802.15.5 WMSN (Bezdrátová síť typu Mesh pro senzory - Wireless Mesh Sensor Network), který definuje protokol pro *mesh* sítě nad IEEE 802.15.4.

Vzhledem k výhodám - ISM (volně licencované) a především ceně se jedná o nej-používanější pásma pro průmysl a aplikace spojené s bezdrátovým přenosem dat. Standard IEEE802.15.4 tvoří základnu pravidel pro společnou komunikaci Low-Rate zařízení. Přehledné srovnání je na Obr.1.1.



Obr. 1.1: Srovnání hlavních bezdrátových standardů [6]

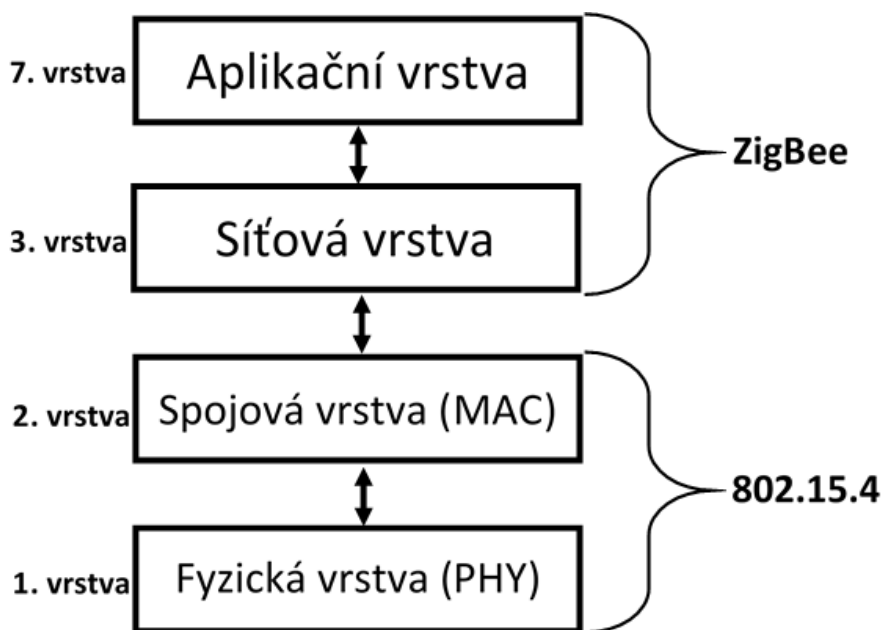
1.1.1 IEEE 802.15.4

Tento standard definuje komunikaci na druhé vrstvě modelu OSI (Propojení otevřených systémů - Open System Interconnection). Jeho hlavním úkolem je umožnění komunikace mezi dvěma zařízeními. Byl vytvořen institutem IEEE, jehož hlavním úkolem je definovat standardy, aby se při technologickém vývoji mohlo počítat se společnou skupinou stanovených pravidel [7].

Pod tímto standardem jsou 3 základní pásma 868–868.6 MHz, 902–928 MHz, 2400–2483.5 MHz (další pásma, která jsou zahrnuta v základním popisu - tedy 314–316 MHz, 430–434 MHz a 779–787 MHz jsou pásma používaná v Číně pod IEEE802.15.4c). Nádstavbu IEEE 802.15.4 tvoří Zigbee. Ten totiž navíc definuje třetí a vyšší vrstvu modelu OSI jak je zřejmé z Obr.1.2.

Kromě ZigBee jsou na tomto standardu postaveny i další, v průmyslu hojně používané protokoly - WirelessHART, ISA100 a další. Tyto jsou postaveny nad spojovou vrstvou, proto již dále nejsou zmiňovány.

Nízká spotřeba u zařízení je dána tím, že zařízení je po většinu času v režimu spánku (*Sleep*).



Obr. 1.2: Vrstvový model ISO/OSI pro standard ZigBee

Popis fyzické vrstvy

Fyzická vrstva tvoří nejnížší vrstvu v modelu ISO/OSI. Tato vrstva se v literatuře označuje jako *PHY*. Zajišťuje přímý přístup k fyzickému médiu (v tomto případě

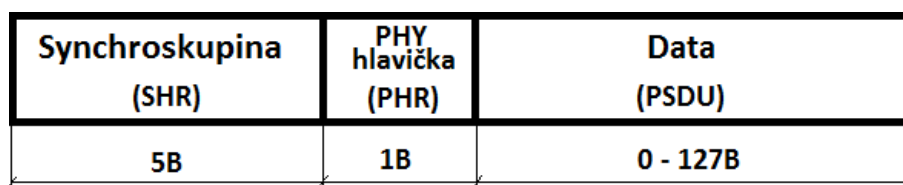
Tab. 1.1: Přehled frekvenčních pásem

Frekvenční rozsah [MHz]	Datová propustnost [kb/s]	Šířka pásma [MHz]	Dostupnost
433,05 - 434,79	10 - 100	1,74	Evropa
870 - 868,6	20 - 250	1,4	Evropa
902,00 - 928,00	40 - 250	26	USA
2400 - 2500	250	100	Globálně

vzduch). Komunikace probíhá (zejména v průmyslu a domácí automatizaci) na kmitočtech vyznačených v Tab.1.1 S vyššími vrstvami komunikuje fyzická vrstva prostřednictvím spojové vrstvy (někdy také označované jako MAC).

Stará se o aktivaci a deaktivaci rádiových modulů, kvalitu linky, výběr vhodného komunikačního kanálu a příjem a vysílání zpráv přes fyzické médium [8]. Dále má na starosti výběr frekvence kanálu a posouzení kanálu pro CSMA/CA (Metoda vícenásobného přístupu k médiu se zamezením kolize - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) - na fyzické vrstvě tedy musíme být schopni určit, zda je přenosové médium volné.

Datová jednotka Na této vrstvě se nejmenší datová struktura nazývá rámec (běžně se používá označení paket, ale ten je datovou strukturou vyšších vrstev; paket se dále do těchto rámců dělí s potřebnou režii). Popis rámce je na Obr.1.3. Celá



Obr. 1.3: Struktura datové jednotky fyzické vrstvy

datová jednotka se potom označuje jako PPDU (PHY Protocol Data Unit). Následující podkapitola se zabývá modulacemi standardu 802.15.4g, především proto, že je podporován některými obvody z přehledu v kapitole 2.

Typy modulací 802.15.4g

Standard 802.15.4g zakládá na typech modulací pod 802.15.4 (OQPSK, FSK), ale některé jsou podporovány pouze pod IEEE 802.15.4g (OFDM). Digitálním typem FM modulace je FSK (Klíčování frekvenčním posuvem - Frequency-Shift Keying).

Zde se informace moduluje diskretní změnou frekvence nosné vlny. Jedná se tedy o řízení nosného kmitočtu binárním modulačním signálem. Standard používá *2FSK* a *4FSK* (používá při vysílání dat 2 a 4 frekvence). Dalším typem modulace je PSK, tedy digitální fázová modulace. Pokud bychom použili jako modulační signál pro PSK binární signál nabývající dvou stavů, tak by měl modulovaný signál v místech změny modulačního signálu opačnou fázi. Forma PSK používaná standardem je *OQPSK* (Offset Quadrature Phase-Shift Keying) využívající čtyři různé hodnoty fáze při vysílání. Dále se používá *OFDM* (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), tedy širokopásmová modulace využívající ke komunikaci kmitočtové dělení kanálu.

Odolnost proti šumu a rušení

802.15.4 používá DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum - technika přímého rozptřené spektra) pro modulaci informace, než je zpracována na fyzické vrstvě. Každý přenášený bit je před odesláním modulován do několika různých signálů (sekvence většího počtu bitů). Toto pak způsobí, že všechny bity, které mají být odeslány zabírají větší šířku pásma, ale při menší spektrální hustotě výkonu na každý signál. Přenášená informace je pak méně náchylná proti šumu (jednodušší detekce signálu přijímačem) avšak za cenu redundance (jeden bit je zastoupen sekvencí bitů).

1.2 Sítě na velké vzdálenosti

1.2.1 LoRa

Je to bezdrátová technologie, která byla vyvinuta pro umožnění komunikace snímačů a akčních členů na velké vzdálenosti s nízkou rychlostí přenosu dat. Takové sítě se označují jako LoRaWAN. Síť LoRa se skládá z koncových zařízení a brány, která je připojena přes IP rozhraní (Ethernet, 3G,..) do sítě. Nejčastěji je využívána topologie typu hvězda [4].

Modulace

LoRa modulace, tedy proces fyzické vrstvy LoRa sítě, kterou si nechala patentovat firma Semtech (Semtech proprietární modulace) pro použití na velké vzdálenosti (vysoká přijímací citlivost, umožňuje použití levných krystalů). Pro přenos informace využívá DSSS. To umožňuje demodulovat signál 20 dB pod prahem šumu při kombinaci demodulace s korekcí chyb FEC. Zisk potom může být o více než 25 dB lepší než klasické FSK, které může být v ostatních případech použito [5].

2 PŘEHLED LOW-RATE RF MODULŮ¹

Tato kapitola by měla zpřehlednit aktuálně dostupná rádia (integrované obvody, které jsou základním stavebním kamenem RF modulů) pracující v různých pásmech na frekvencích od (300-1000)MHz. Na světě se tímto zabývají někteří renomovaní výrobci elektroniky, resp. RF IO (Semtech, Microchip, Texas Instruments, SiliconLabs). Pro zprovoznění spojení s těmito obvody (potažmo moduly) je zapotřebí řídicí jednotka (MCU). Většina z uvedených firem nabízí také kompletní řešení (integrovaný MCU + RF obvod), ale to je nad rámec tohoto přehledu.

Přestože existují i další výrobci RF integrovaných obvodů, o kterých ještě bude pojednáno (např. HOPE Microelectronics, STMicroelectronics), jsou v tomto přehledu uvažováni pouze dříve zmínění. Konkrétní obvody, které nás zajímají, pracují ve frekvenčních oblastech 315/433/868/915MHz. Pro srovnání používáme především elektrické parametry, případně jsou zmíněny některé speciální funkce nebo způsob použití. Obecná použití (tedy především domácí automatizace, bezdrátové alarmy, bezpečnostní systémy atp.) nejsou v přehledu zmíněna. Podobně také některé základní funkce (frekvenční syntéza) jsou z přehledu vypuštěny. Za rozhodující parametry srovnávaných obvodů považujeme:

- Napájecí napětí
- Vysílací výkon
- Odběr el. proudu v klidovém režimu (Standby/Sleep)
- Přijímací citlivost
- Frekvenční rozsah
- Pouzdro
- Bezpečnost
- Šířka pásma (BW)
- Maximální rychlost (Data-rate/Bit-rate)
- Podporované typy modulací

Pro srovnání je také uveden parametr RSSI (Indikátor „síly“ přijímaného signálu - Received signal strength indication). Jedná se o indikátor výkonu přijatého signálu. Tato hodnota se získává buď analogově vyčítáním hodnoty analogovým vstupem mikrokontroléru, nebo (a to nejčastěji) digitálně nastavením určitého status bitu (po překročení předdefinované úrovně signálu v dBm).

¹TATO RÁDIA (NE ALE VŠECHNA) SE DAJÍ POUŽÍT PRO STANDARD IEEE 802.15.4 ŽÁDNÉ Z NICH ALE NENÍ PŘÍMO SPECIALIZOVANÉ PRO 802.15.4 - TA OBSAHUJÍ PŘÍMO PŘEDDEFINOVANÉ MODULACE I PODPORU MAC VRSTVY.

2.1 Orientace v přehledu

Řešerše je logicky členěna a nachází se v příloze A. Pro přílišnou rozsáhlost jsou některé parametry při získávání té které hodnoty vypuštěny (např. Bit-rate při určování přijímací citlivosti) a je uvedena pouze krajní hodnota (maximální/minimální). Proto se některé parametry mohou lišit od hodnot udávaných v různých dostupných přehledech za stanovených (jiných) podmínek. Zkratka Neuv znamená, že výrobce danou hodnotu přímo neuvedl v manuálu.

2.2 Semtech

Semtech má v přehledu největší zastoupení, a to ve všech směrech - ať už se jedná o počet zařízení s podporou šifrování nebo počet zařízení podporující modulaci pro velké vzdálenosti (LoRa), viz Přílohu A.1. Pro výčet parametrů pro naše srovnání nabízel tento výrobce všechny informace přehledně v tabulkách. Ze speciálních použití lze zmínit RKE (Remote Keyless Entry system) - jedná se o elektronický zámek, který řídí přístup do budov nebo vozidel a Wireless-MBUS (sběrnice k přenosu dat a řízení v oblasti topných, vodních a plynových systémů, případně elektrické energie). Dále jsou zde zařízení podporující Aktivní RFID (tag obsahuje samostatnou baterii, proto požaduje menší signál od čtečky). Výrobce nabízí vlastní přehled RF zařízení, kde navrhuje optimální řešení kombinací vlastních produktů.

2.3 Microchip

Microchip má v přehledu naopak nejmenší zastoupení. Je to nejspíše dáno orientací na produkty s MCU a zřejmé nasazení mikrokontrolérů PIC a především orientací produktů na frekvenční pásmo 2,4GHz. Přehled dostupný od výrobce je velice stručný, věcný, nicméně některé obvody zde nejsou uvedeny (rfRXD0420/0920). Tento výrobce nabízí různé vývojové nástroje - viz [10]. Řešerše produktů firmy Microchip je v Příloze A.2.

2.4 Silicon Labs

Tato firma má v přehledu celkem početné zastoupení. Za zmínění stojí také relativně největší množství zařízení s podporou RKE v celém přehledu. Ve většině se jednalo o obvody *Low-Current*, tedy obvody s malým odběrem proudu především v klidovém režimu (*Sleep*). Obvody Silicon Labs měly také asi největší teoretickou datovou propustnost (Bit-rate). Výrobce nabízí asi nejpřehlednějšího průvodce, kde lze nalézt

přehled jednotlivých rádiových obvodů přes řešerši vývojových kitů až po testovací karty - viz [11]. Srovnání RF IO od firmy Silicon Labs jsou v Příloze A.3.

2.5 Texas Instruments

Obvody Texas Instruments také ve velké míře podporují RKE. Dokonce i TPMS (Tire-Pressure Monitoring System - tedy elektronický systém navržený pro monitorování tlaku v pneumatikách v různých typech dopravních prostředků). Je zřejmé, že existují *Automotive* varianty produktů (-Q1). Některé obvody v přehledu mají aktivní RFID. Výrobce nabízí přehledného průvodce, možná zbytečné je zde schéma zapojení, které nalezneme v manuálu konkrétního obvodu (viz [12]). Přehled produktů Texas Instruments je v Příloze A.4.

2.6 Další výrobci

Jedná se o Melexis, STMicroelectronics, MICREL Semiconductor, HOPE Microelectronics, Freescale a NXP Semiconductor ².

2.6.1 Melexis

Výrobce nabízí bezdrátové obvody přímo v kategorii TPMS. Protože výrobce poskytuje pouze malý počet obvodů, je uveden základní přehled obvodů v Tab.2.1. Zařízení tohoto výrobce nepodporují žádný standard (IEEE802.15.4(g)). Přestože jsou doménou tohoto výrobce senzory pro motory, TPMS kategorie také zahrnuje obvody obsahující senzor a mikrokontrolér umožňující použití v TPMS modulu.

Tab. 2.1: Základní parametry obvodů výrobce Melexis [13].

Označení	Rx/Tx	Frekvence [MHz]	Modulace	Poznámka
MLX71122	Rx	27 - 930	FSK/FM/ASK	-
MLX72013	Tx	433	FSK/ASK	-
TH72005	Tx	315	FSK/ASK	-
TH72015	Tx	433	FSK/ASK	-
TH7122	Tx	27 - 930	FSK/FM/ASK	Vícekanálový
TH71221	Tx	27 - 930	FSK/FM/ASK	Vícekanálový

²NXP a Freescale jsou od 02/2015 spojeny, proto jim bude věnována společná podkapitola.

2.6.2 STMicroelectronics

K dispozici jsou pouze dva obvody, jejichž základní přehled je v Tab.2.2. Výrobce dále nabízí hotové moduly s mikrokontrolérem (klient) a UART rozhraním pro připojení k externímu MCU.

Tab. 2.2: Základní parametry obvodů výrobce STMicroelectronics [14].

Označení	Rx/Tx	Frekvence [MHz]	Modulace	Poznámka
SPIRIT1	Rx,Tx	150-174 300-348 387-470 779-956	2FSK/GFSK/MSK/ GMSK/OOK/ASK	AES 128
STS1TX	Tx	150-174 300-348 387-470 779-956	2FSK/GFSK/MSK/ GMSK/OOK/ASK	AES 128

2.6.3 MICREL Semiconductor

Výrobce nabízí širokou škálu obvodů přijímačů, vysílačů i transceiverů. Přijímače jsou v řadách MICRF0xx a MICRF2xx a mohou pracovat na frekvencích v rozsahu 300 - 450 MHz a 850 - 950 MHz s modulacemi ASK/OOK. Vysílače jsou v řadách MICRF1xx, MICRF4xx a MAQRF1xx a jsou zde obvody pracující ve frekvenčním rozsahu 290 - 980 MHz a podporující modulace ASK/OOK/FSK. Obvody umožňující vysílání i příjem jsou v řadě MICRF5xx, mají pracovní kmitočty nacházející se v rozsazích 410 - 510 MHz a 850 - 950 MHz a podporují modulaci FSK [15].

2.6.4 HOPE Microelectronics

Výroba obvodů přijímačů, vysílačů i transceiverů případně již hotových modulů jsou hlavní doménou tohoto výrobce, proto má HOPE rádiových obvodů velké množství. Přijímače jsou v řadě CMT22xxX a RF65W, podporující frekvence z rozsahu 300 - 960 MHz. Vysílače jsou v řadě CMT21xxX a obvody RF67W a RF68W, pracující v kmitočtovém rozmezí 240 - 960MHz. Transceivery jsou RF63W, RF64W, RF69W, 290 - 1020 MHz. Zmíněné obvody mohou podporovat modulace FSK/OOK. Výrobce nabízí také moduly s modulací LoRa [16] .

2.6.5 Freescale a NXP

Tabulka s rádiovými obvody od NXP je v Tab.2.3. Výrobce uvádí použití RKE Freescale nabízí pouze kompletní bezdrátová řešení.

Tab. 2.3: Základní parametry obvodů výrobce NXP [17].

Označení	Rx/Tx	Frekvence [MHz]	Modulace	Poznámka
OL2300NHN	Tx	315/434/869/915	FSK/OOK/ASK	-
OL2311AHN	Rx	315/434/868/915	FSK/ASK	-
OL2381AHN	Rx,Tx	315/434/868/915	FSK/ASK/GFSK	-

2.7 Shrnutí

Tato rešerše má uspořádat podstatné parametry RF integrovaných obvodů. Při většině aplikací nejspíše rozhodne dostupnost (tedy ten obvod, který má blízký distributor elektroniky). Při náročnějších aplikacích (zmíněné použití pro automobilovou dopravu) se vyplatí vybrat obvody, které potřebnou funkci (RKE, TPMS) samy nabízejí.

3 HARVESTERY ENERGIE

3.1 Základní popis

V cizojazyčných materiálech je s harvestery energie spojován pojem *Energy harvesting*. Jedná se o výraz pro technologii získávání (sběru) energie nejčastěji v elektrické formě. Existuje více druhů harvesterů energie v závislosti na principu používaném pro získávání energie:

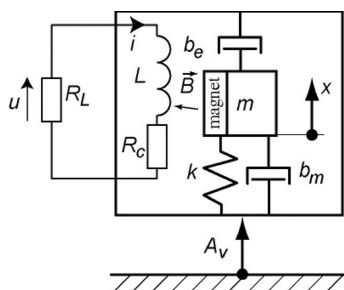
- Vibrační - využívají princip indukčního zákona nebo piezoelektrického jevu
- Solární - použití fotovoltaických buněk pro generování energie
- Termální - ke generaci energie dochází, pokud existuje teplotní gradient mezi termoelektrickým zařízením a teplotou okolního vzduchu.

V našem případě jsou použity vibrační harvestery, které získávají energii ve formě střídavého napětí.

3.2 Principy vibračních harvesterů energie

Piezoelektrický jev Využívá vlastnosti piezomateriálů - při mechanickém působení lze na něm naměřit elektrické napětí (přímý piezoelektrický jev). Krystalová mříž těchto materiálů při deformaci postrádá střed symetrie - na určitých plochách krystalu se tak objeví elektrický náboj a ten vyvolá vnitřní elektrické pole v krystalu (na rozdíl od ostatních materiálů, které si centrovanou mřížku zachovávají i po deformaci, a tudíž je celkový náboj na povrchu nulový) [23].

Elektromagnetická indukce Vychází z Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Tedy změní-li se magnetický indukční tok za čas Δt o $\Delta \Phi$, indukuje se ve vodiči elektromotorické napětí úměrné časové změně toku. Tato změna je způsobena pohybem permanentního magnetu jak je naznačeno na Obr. 3.1



Obr. 3.1: Principiální schéma vibračního harvesteru využívajícího elektromagnetickou indukci [22]

3.3 Použití

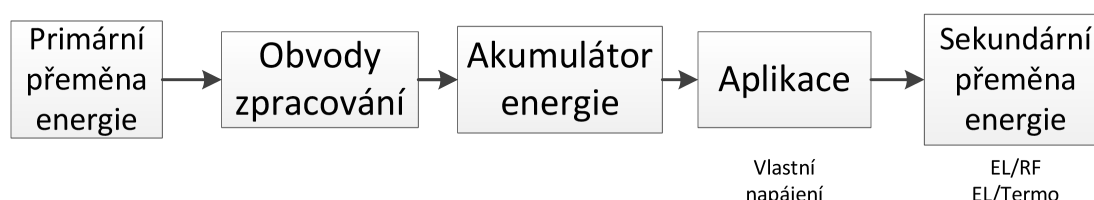
Primární účel vývoje vibračních harvesterů energie je úspora nákladů za kabeláž a omezení potřeby dodatečného zdroje energie. Lze je rozdělit na 3 větší kategorie

- **Aplikace ve stavebnictví** - Oblast snímačů v zabudovaných např. do konstrukcí mostů, použití bezdrátových přepínačů v budovách.
- **Oblast bezdrátových senzorů** - použití u senzorů stavu strojů a procesů [28] (např. naše aplikace v automobilové dopravě). Dále je sem možné zahrnout aplikace biomechanického charakteru, např. generátor elektřiny využívající pohyb kolenního kloubu atp.
- **Ostatní** - tato kategorie zahrnuje další aplikace *energy harvesting*u např. kapesní svítilna využívající zmíněného principu elektromagnetické indukce .

3.4 Další komponenty

Ostatní části, které jsou potřeba pro použití jsou obvody pro získání energie a samotný akumulátor energie . Obvody jsou většinou složeny z usměrňovacího můstku (požadujeme stejnosměrné napětí), filtračního kondenzátoru a stejnosměrného pulzního měniče. U všech částí je primární nízký příkon, aby nedocházelo k energetickým ztrátám. Efektivita těchto obvodů je stále předmětem výzkumů [26].

Blokové schéma aplikace harvesterů energie je na Obr.3.2

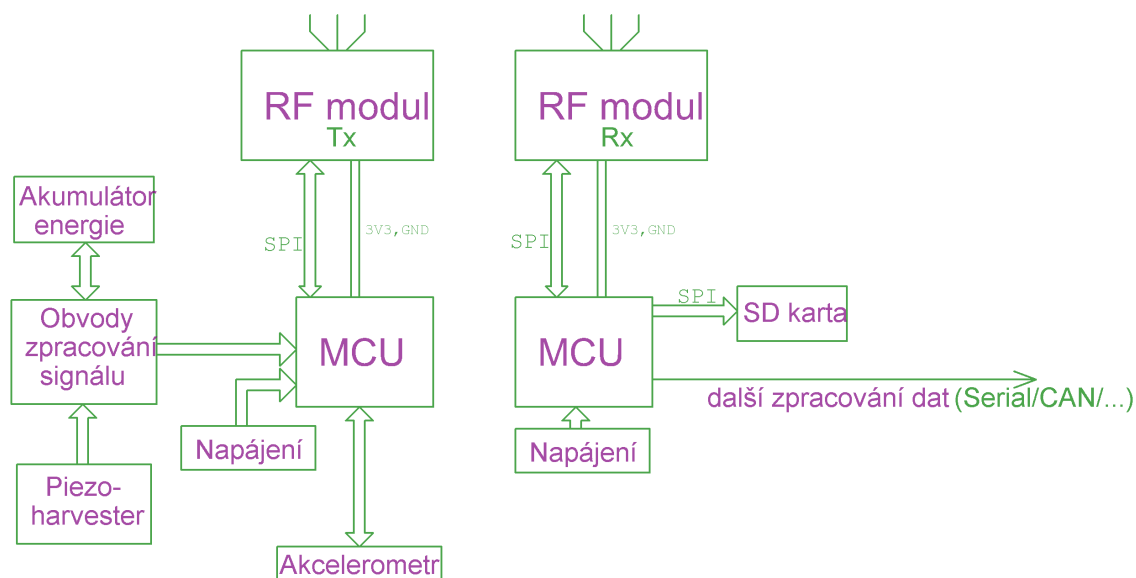


Obr. 3.2: Blokové schéma aplikace vibračního harvesteru energie

4 NÁVRH ŘEŠENÍ PŘÍPRAVKU PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ VIBRAČNÍHO HARVESTERU ENERGIE

Výslednou aplikací přípravku je schopnost sběru dat z vibračního harvesteru a další dostupné senzorky pro pozdější vyhodnocení.

Vycházejí z předešlých kapitol je klíčovým předmětem měřicího přípravku vibrační harvester (na trhu je zatím vyrábí relativně málo výrobců). Dále pomocný obvod a akumulátor energie. Vzhledem k tomu, že je přípravek určen především k měření, případně testování, je požadavek, aby byla možnost získávat informace o stavu nabití akumulátoru. Pro pozdější srovnání je vhodné použít akcelerometr (nabízí se použití vývojového kitu obsahujícího měřič zrychlení jako přídavnou periférii, namísto samotného mikrokontroleru). Výběr rádiového modulu je, jak plyne z kapitoly 1 potažmo z kapitoly 2, především otázkou aktuální dostupnosti. Protože schopnost samonapájení skrze piezo-harvester je stále ve vývoji, musíme při měřeních použít dodatečné napájení. Nabízí se použití vysokokapacitních monočládkových baterií nebo menších akumulátorů. Blokové schéma navrženého řešení je na Obr.4.1.



Obr. 4.1: Blokové schéma přípravku pro měření parametrů vibračního harvesteru energie

5 ŘÍDICÍ JEDNOTKA A POUŽITÉ PERIFERIE

5.1 Rádiový modul RFM95W

Jedná se o komunikační modul s nejširším spektrem použití - od automatizace domácností a budov, přes bezdrátové alarmy až po dalekosáhlé zavlažovací systémy. RFM95W je také vhodný pro naše použití v automobilovém průmyslu (RKE, TPMS). Jedná se o transceiver, umožňuje tedy plnit funkci vysílače (Tx) i přijímače (Rx). Jádrem modulu RFM95W integrovaný obvod RF96 od výrobce HOPE Microelectronics. Je to ekvivalentní obvod k obvodu SX1276 od výrobce Semtech, jehož parametry jsou uvedeny v Příloze A.1. Obvod je disponuje FSK a LoRa modulacemi, přičemž LoRa umožňuje komunikaci až na několik kilometrů. Umožňuje nastavení šířky rozprostřeného spektra (BW), dále parametru SF (Spreading factor - podíl rychlosti přenosu pulzů DSSS a rychlosti přenosu jednotlivého znaku *chip rate/symbol rate*). Přehled parametrů modulu je v Tab. 5.1. Modul je v SMD provedení s postranními kontakty (viz Obr 5.1). My jsme jej připájeli na desku s SMA konektorem pro anténu.

Komunikace modulu a mikroprocesoru probíhá přes SPI rozhraní, které je využíváno

Tab. 5.1: Parametry rádiového modulu RFM95W

Výrobce	HOPE MICROEL.
Označení	RFM95W
Použitý IO	SX1276
Rozměry modulu [mm]	16x16
Frekvence [MHz]	868
Šířka pásma [kHz]	250kHz
Bezpečnost	-
max. Bit-rate [kb/s]	300
Modulace	FSK/OOK, LoRa
Rozhraní	SPI
Napájecí napětí [V]	1,8 - 3,7
RSSI d. rozsah [dB]	127
Sleep mode [μA]	0,2
Tx proud [mA]	120
Rx proud [mA]	12,1
Tx Výkon [dBm]	20
Rx citlivost [dBm]	-123

jednak pro přenos dat, tak pro přenos konfiguračních příkazů. Příkazy zapisujeme



Obr. 5.1: Modul RFM95W při umístění na desce s SMA konektorem pro anténu

do registrů dle požadované konfigurace (tuto nám v základní verzi poskytuje námi používaná knihovna).

5.1.1 Zapojení

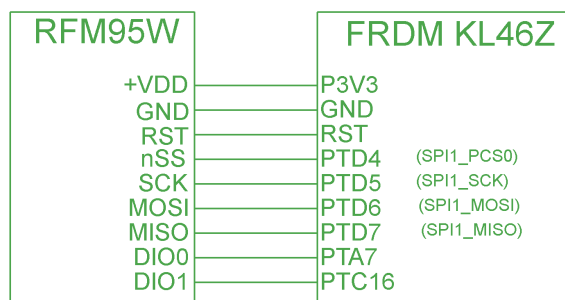
SPI

Jak již bylo zmíněno, modul disponuje rozhraním SPI (Serial Peripheral Interface) pro připojení k mikrokontroléru. Slouží pro komunikaci na krátké vzdálenosti a nejběžnější použití je v embedded systémech a pro komunikaci se snímači. Jedná se o tzv. *full-duplex* rozhraní - obě zařízení tedy mohou vysílat najednou, typu *master-slave*.

Zařízení master (v našem případě MCU) vysílá hodinový signál na pinu SCK (Serial Peripheral Interface) pro zařízení typu slave (transceiver RFM95W). Dále master vysílá signál nSS (Slave Select (aktivní v log.0)) kterým určuje, kdy má být ten který slave aktivní. Následují MISO (Master Input Slave Output) a MOSI (Master Output Slave Input), tedy datové vodiče.

Propojení MCU a rádia

Klíčovým zařízením při jakémkoli použití RFM95W je mikroprocesor (nebo jiný řídicí obvod). My jsme použili vývojovou desku od firmy Freescale FRDMKL46Z. Kromě napájecích vodičů resp. resetu (nRES - aktivní v log.0) a SPI, jsou zde piny DIO0 a DIO1 (sloužící pro zpětnou vazbu od rádia - objeví se na nich specifické hodnoty v důsledku nějaké akce rádia). Podrobné informace o propojení modulů viz Obr.5.2.



Obr. 5.2: Blokové schéma propojení vývojové desky s rádiovým modulem

5.1.2 Programování

MBED

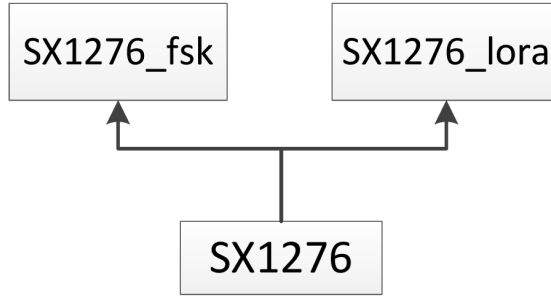
Mbed Compiler poskytuje lehké on-line C/C++ vývojové prostředí (IDE), které je předem nakonfigurováno, aby umožňovalo rychle psát programy, zkompilovat a stáhnout je prostřednictvím *drag&drop* do mikrokontroléru. Ve skutečnosti se nemusí nic instalovat nebo nastavovat. Vzhledem k tomu, že je mbed webová aplikace, je možnost se přihlásit z libovolného místa, a pokračovat tam, kde jsme přestali, a máme možnost pracovat na OS Windows, Mac, iOS, Android, Linux, nebo na všech z nich [20].

Použité knihovny

Pro obsluhu jsou využity knihovny od výrobce obvodu SX1276 (Semtech) v prostředí mbed.org (sx127x [31]), které jsme modifikovali pro použití pro modul RFM95W (samotný rádiový obvod může být provozován přibližně od 137 MHz do 1020 MHz, nicméně v našem modulu je jeho použití dané zapojením pro pásmo 862 MHz až 1020 MHz, což knihovna nezohledňuje). V první řadě se provádí inicializace modulu odesláním konfiguračních příkazů. Seznam konfiguračních příkazů lze nalézt v katalogovém listu modulu RFM95W [18]. Lze nastavovat vysílací výkon, frekvenční deviace, bitovou rychlost, podobu synchronizačního bytu, lze aktivovat wake-up časovač, detekci nízké napájecí úrovně, RSSI a spoustu dalších parametrů. Schéma použité knihovny je na Obr.5.3.

Řešení vysílače

Algoritmus vysílače s využitím modifikovaných knihoven SX1276 je na Obr.5.4. Jak je ze schématu zřejmé, funkce *enable()*, *start_tx()* a *service()* jsou implementovány různě při použití knihovny *SX1276_fsk* a *SX1276_lora* (viz Obr.5.3). Následuje detailnější popis funkcí v jednotlivých módech:



Obr. 5.3: Schéma použitých knihoven

- **LoRa**

- `enable()` - nastavuje *Long Range* mód.
- `start_tx()` - nastaví ukazatel FIFO na *FifoTxPtrBase* a zapíše do zásobníku nastavený počet znaků (hodnota zapsaná v registru *RegPayloadLength*) z pole *tx_buf*.
- `service()` - pokud je DIO1 v log1 (*FhssChangeChannel*), nastaví nosnou frekvenci dle tabulky (pole *frfs*) a následně na základě DIO0 určí, zda rádio vše úspěšně odeslalo (*SERVICE_TX_DONE*, při DIO0 v log1).

Přímý vztah mezi SF a BW není udáván v manuálu, ale zpravidla při zachování hodnoty *Spreading factoru* s rostoucí šířkou pásma roste *bitrate*.

- **FSK**

- `enable()` - nastavuje *FSK/OOK* mód.
- `start_tx()` - pokud je nastavená proměnná délka paketu, nastaví počet odesílaných znaků na číslo zadané jako argument, jinak to nastaví na *PayloadLength*, zapíše do zásobníku data z pole *tx_buf* a nastaví mód transceiveru na *RF_OPMODE_TRANSMITTER*.
- `service()` - pokud je DIO0 v log1 nastaví *standby* mód a vrátí *SERVICE_TX_DONE*.

Na rozdíl od LoRa módu, je výrobcem udáván vztah mezi konfiguračními parametry (*bitrate*, deviační frekvencí, potažmo šířkou pásma přijímače) [18]. Pro zajištění správné modulace musí platit

$$F_{DEV} + \frac{BR}{2} \leq 250 \text{ kHz} \quad (5.1)$$

kde F_{DEV} je deviační frekvence a BR je *bitrate*. Dále musí být demodulační index β pro zajištění co nejvíce efektivní demodulace v rozmezí $0,5 \leq \beta \leq 10$. Určíme jej dle vztahu:

$$\beta = \frac{2F_{DEV}}{BR} \quad (5.2)$$

Šířku pásma přijímače pak určíme ze vztahu:

$$BW = F_{DEV} + \frac{BR}{2} \quad (5.3)$$

- **GFSK** - využívá stejnou konfiguraci knihoven jako mód FSK, pouze má navíc v konfigurační části (Obr.5.4) nastaven Gaussův filter BT na hodnotu 0,5 nebo 1,0 (zápisem do registru RegPaRamp příkazem `write_reg(REG_PARAMP, 0x29)` pro BT = 1,0)

Řešení přijímače

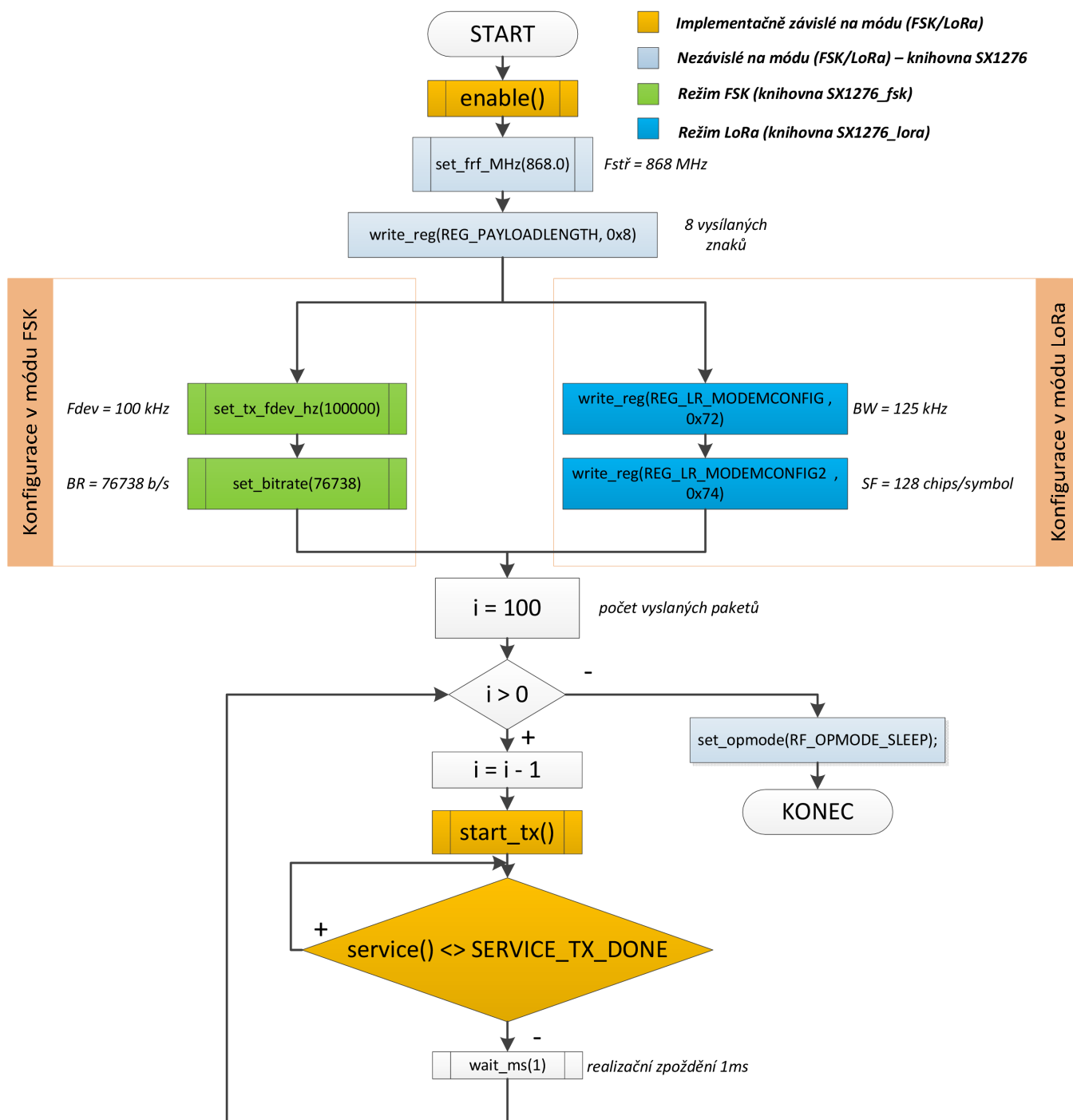
Řešení přijímače je na Obr.5.5. Funkce `enable()` byla popsána výše, funkci `service()` popíšeme z perspektivy přijímaných dat. Konfigurace při modulaci GFSK je po nastavení hodnoty Gaussova filtru shodná s FSK.

- **LoRa**
 - `start_rx()` - nastaví ukazatel FIFO na `FifoRxPtrBase` a nastaví mód přijímače (RF_OPMODE_RECEIVER).
 - `service()` - dojde ke kontrole hlavičky a následně logické úrovně na DIO0. Pokud se nachází na potenciálu log0 (RxDone), dojde k vyčtení potřebných registrů a nastaví pointer v bufferu na poslední přijatý byte a zapíše všechny byty (payload) ze zásobníku do pole `rx_buf` a je vrácena hodnota SERVICE_READ_FIFO.
- **FSK**
 - `start_rx()` - nastaví mód přijímače (RF_OPMODE_RECEIVER).
 - `service()` - v závislosti na formátu paketu nastaví délku přijímacího bufferu (`rx_buf`). Vyčte data ze zásobníku a uloží do pole `rx_buf`. Vráti hodnotu SERVICE_READ_FIFO.

V konfiguračním bloku přibyly dva příkazy - nastavení šířky pásma přijímače (určíme ze vztahu 5.3) a nastavení korekce (rozdíl skutečné šířky pásma a nastavené podělený frekvencí kroku, která je přibližně 61 Hz).

Použití pro IEEE 802.15.4

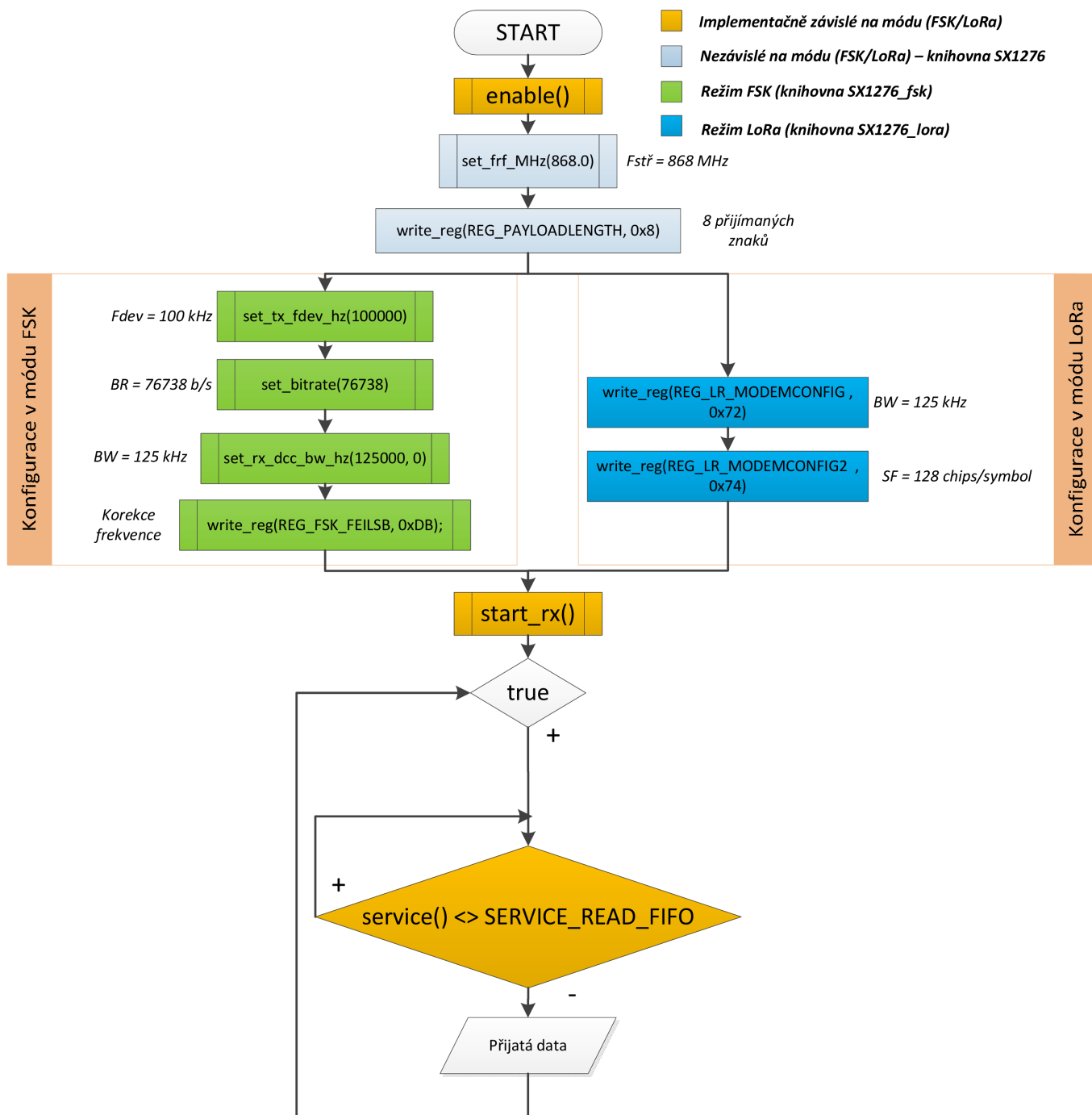
V tomto režimu jsme modul neprovozovali ani neměřili, použití je však možné. Při použití námi modifikovaných knihoven bychom museli použít funkci `init()` z knihovny `SX1276_fsk`. Jedná se o nastavení detekce preamble. Bylo by ale také nutné implementovat korekci chyb přenosu - CRC, která v námi používané knihovně implementována není.



Obr. 5.4: Blokové schéma algoritmu vysílače pro modul RFM95W

5.1.3 Základní měření

Provedli jsme měření dosahu pro různé typy modulací. Testování správnosti zprávy vycházelo ze znalosti vysílaných dat a jejich kontrola na přijímací straně.



Obr. 5.5: Blokové schéma přijímače při cyklickém výpisu dat

Popis prostředí

- (a) Prostředí - 16 °C, bez srážek, 2 - 3 % převýšení Tx vůči Rx, venkov - Rx v centru obytné části, pravidelný profil.

- (b) Prostředí - 20 °C, bez srážek, blízko vojenského prostoru (možné rušení), nepravidelný profil, více překážek než v a)
- (c) Prostředí - 20 °C, bez srážek, Rx výše než Tx, přímá trasa z venkova do města a průjezd městem, bez větších překážek.

LoRa

Vzhledem k tomu, že LoRa je modulace pro velké vzdálenosti, je základním parametrem pro měření dosah. Měřilo se relativní množství přijatých zpráv v závislosti na vzdálenosti. Hlavními parametry měření byla šířka pásma (500 kHz a 125 kHz) a SF (128 ch/s a 4096 ch/s) Přehled všech parametrů je v Tab.5.3. Délka paketu odpovídá Obr.1.3, přičemž přibyla redundance pro CRC (2 B). Délka samotné zprávy byla 8 B, dále preamble 8 B, synchronizace 1 B. Grafické znázornění je na Obr.5.6. Je zřejmé, že největší dosah byl v případě průběhu při BW = 125 kHz a SF = 4096 ch/s, kdy ale měření probíhalo v prostředí c) při nulovém převýšení Rx vůči Tx.

FSK/GFSK

Při měření v režimu FSK / GFSK (při parametru Gaussova filtru BT = 1) jsme opět provedli pouze měření dosahu. Nastavení modulů je v Tab.5.2. Naměřené křivky jsou na Obr.5.7. Při měření nebyla aktivována synchronizace ani detekce preamble, proto byla velikost paketu pouze 8 B.

Spektra pro vybrané typy modulací a podmínky jsou na Obr. 5.8.

Tab. 5.2: Nastavení modulů pro měření při FSK/GFSK modulaci

Délka paketu [B]	8	
Počet odesílaných zpráv	100	
Nosná frekvence [MHz]	867,95	
Čas mezi pakety	modulace	[ms]
	FSK	14,273
	GFSK	14.271
Parametry antén	všesměrová s SMA / 50 Ω/ 2 dBi	
Vysílací výkon [dBm]	20	
Typ modulace	FSK / GFSK	

Tab. 5.3: Nastavení modulů pro měření při LoRa modulaci

Délka paketu [B]	19		
Počet odesílaných zpráv	100		
Nosná frekvence [MHz]	867,95		
Čas mezi pakety	BW [kHz]	SF [ch/s]	[ms]
	125	128	37,071
		4096	828,362
	500	128	10,005
		4096	207,828
Parametry antén	všesměrová s SMA / 50 Ω / 2 dBi		
Vysílací výkon [dBm]	20		
Typ modulace	LoRa		

5.1.4 Měření spotřeby v různých módech

Naměřené hodnoty spotřeby proudu v **LoRa** módu jsou v Tab.5.5 ¹. Je zřejmé, že vysílací výkon roste se zmenšující se šířkou pásma ve vysílacím módu a v režimu přijímače má modul spotřebu přímo úměrnou šířce pásma. V režimu spánku jsme naměřili 0,15 μ A. Tuto hodnotu lze však brát jen orientačně, protože jen chyba z rozsahu (v tomto případě 10 mA) je 1 μ A

Měření spotřeby v **FSK/GFSK** módech je v Tab.5.4, ze které je patrné, že u FSK se při nižším *bit-rate* spotřeba zvyšuje. Přesto bychom však tuto modulaci zvolili při použití měřicího modulu s odesíláním dat.

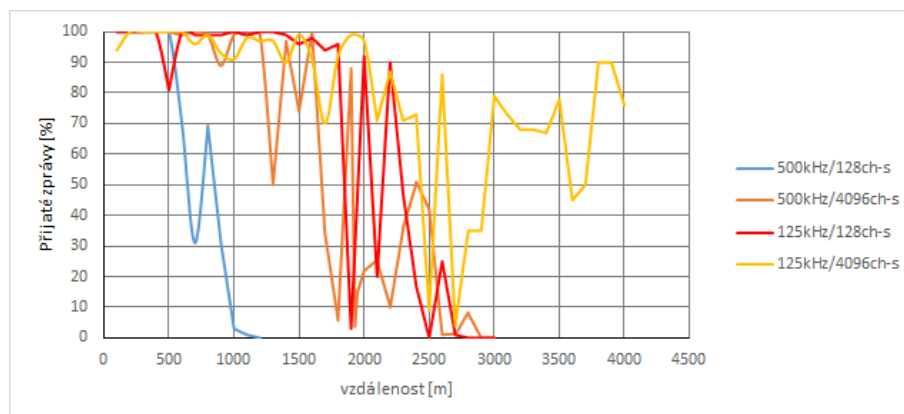
Tab. 5.4: Proudová spotřeba modulu RFM95W v FSK/GFSK módu

Režim	BR [b/s]	I _{Tx} [mA]	I _{Rx} [mA]
FSK	76738	62,346	11,025
	9600	97,466	10,803
GFSK	76738	91,800	11,482
	9600	91,234	11,250

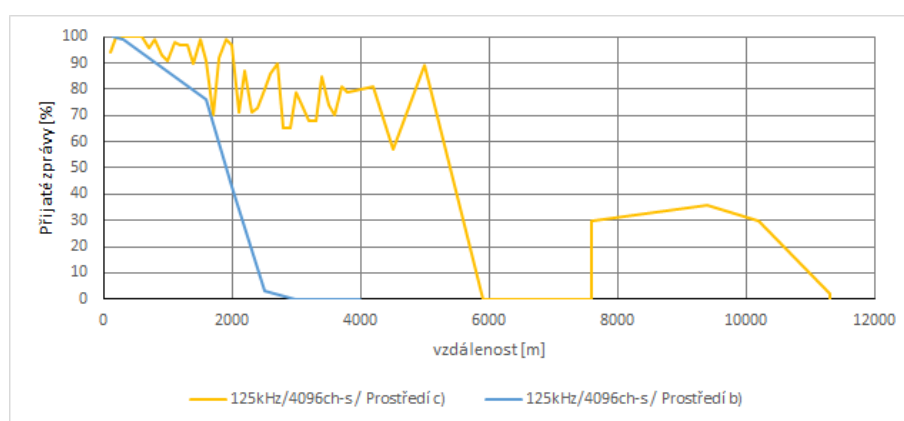
5.2 Vývojová deska

Jak bylo zmíněno u propojení s transceiverem, máme k dipozici vývojovou desku od firmy Freescale, konkrétně platformu Freedom KL46Z. Jedná se o kit postavený

¹Měřeno multimetrem Agilent 34401A



(a) Prostředí a)



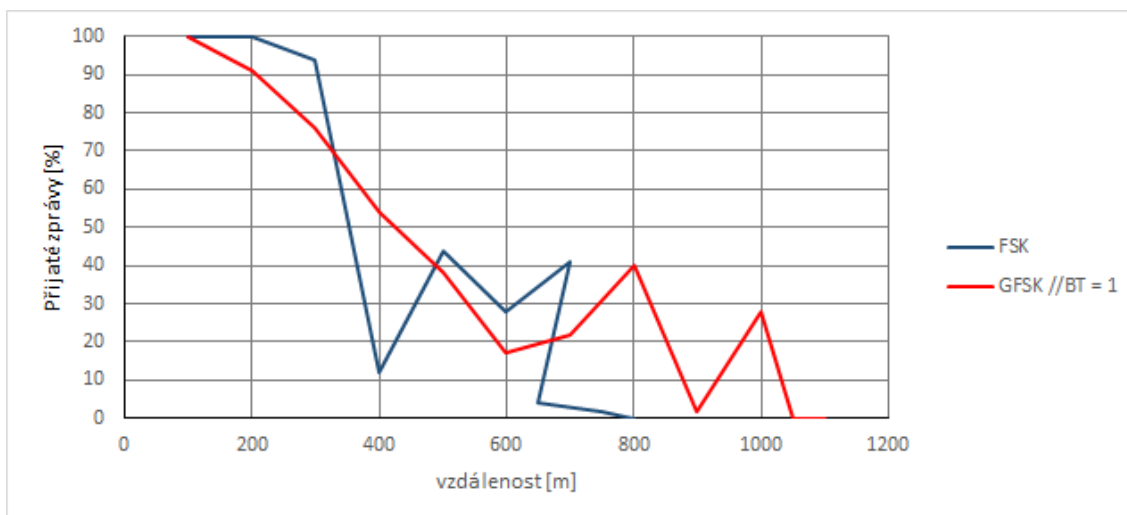
(b) Prostředí b) a c)

Obr. 5.6: Základní měření rádiového modulu RFM95W při modulaci pro velké vzdálenosti LoRa.

na mikrokontroléru MKL46Z256VLL4 z rodiny Kinetis s jádrem Cortex M0+ s schopný fungovat až na frekvenci 48MHz. Deska disponuje rozhraními od SPI přes I2C až po UART, dále USB(host/zařízení) - námi používané pro výpis do konzole; ADC/DAC(6/12bit) převodníky; LCD displej. Sensorová výbava činí magnetometr, akcelerometr, kapacitní dotykový senzor a senzor viditelného světla. KL46Z jak již bylo zmíněno umožňuje *drag&drop* - má tedy vestavěný FLASH programátor. Přehled rozložení pinů a funkcí desky je na Obr. 5.9.

5.2.1 Použití integrovaného akcelerometru

Pro srovnání s harvestrovým snímačem vibrací jsme použili vestavěný akcelerometr z vývojové desky. Jedná se o digitální akcelerometr MMA8451Q. Přehled základních parametrů a rozsahů je v Tab. 5.6. Jedním z klíčových parametrů je ODR (Output Data Rates - rychlost poskytnutí výstupních dat). K mikrokontroléru je akcelerometr



Obr. 5.7: Základní měření rádiového modulu RFM95W při modulaci FSK/GFSK v prostředí a).

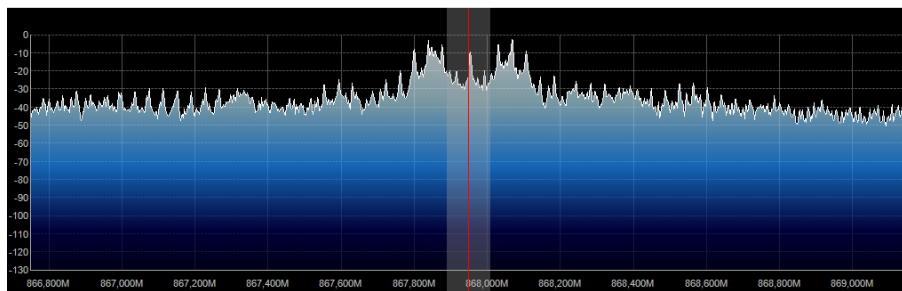
připojen pomocí I2C (Inter-Integrated Circuit).

I2C I2C (Inter-Integrated Circuit) je *multi-master* sběrnice (umožňuje tedy více zařízením řídit komunikaci). Toto rozhraní disponuje pouze jednosměrnou komunikací (*half-duplex*). Ta probíhá pomocí dvou vodičů - datového SDA (Serial Data Line) a hodinového SCL (Serial Clock Line). Sběrnice používají negativní logiku (log.1 při GND). Nejprve *master* vyšle na sběrnici adresu zařízení *slave*, kde LSB je nastaven dle požadavku (čtení / zápis). Následuje potvrzení ACK od podřízeného zařízení. Pak už probíhá komunikace jen mezi těmito zařízeními, dokud *master* nevyšle tzv. *stop-conditions*, čímž ukončí komunikaci se *slave* zařízením a uvolní sběrnici. *Slave* na každý přijatý byte odpoví příznakem ACK.

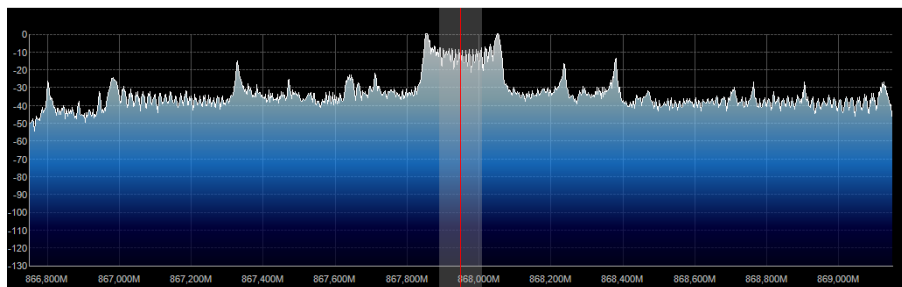
Výběr vhodného módu

U tohoto akcelerometru jsou k dispozici, kromě běžných logovacích módů, např. *tap event* detektor pro detekci definované výchylky (součást naší knihovny), detekce volného pádu a pohybu (*freefall*, *motion*) - tyto jsme ale neimplementovali. Pro naše účely je vhodný některý *logger* mód.

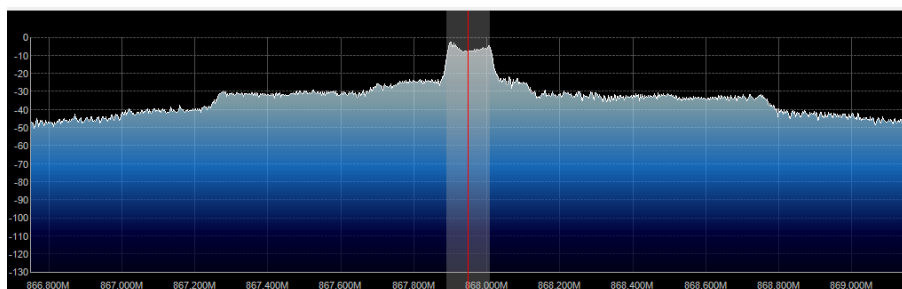
Pro určení nejvhodnějšího módu při měření zrychlení jsme změřili časové prodlevy mezi interrupty pro dostupná ODR. Výsledky jsou v Tab.5.7. Dle prodlevy samotné přerušovací rutiny se jeví nejlepší použití *data-rate* 400 Hz (perioda 2,5 ms - ještě nebude docházet ke ztrátě vzorků).



(a) FSK - $F_{DEV} = 100 \text{ kHz}$, Bit-rate = 76738 kbit/s



(b) GFSK - $F_{DEV} = 100 \text{ kHz}$, Bit-rate = 9600 kbit/s, BT = 1



(c) LoRa - SF = 128 ch/s, BW = 125 kHz

Obr. 5.8: Příklady spektrálních průběhů modulací RFM95W

Nastavení a použité módy

Nastavení akcelerometru do požadovaného módu je provedeno v použité členské funkci z napsané knihovny (vycházeli jsme z [27]). Knihovna obsahuje funkce pro sběr dat při frekvencích 100 Hz, 400 Hz a 800 Hz. Pro naše měření jsme využili 400 Hz logger (v praktických průbězích neočekáváme frekvence větší než 200 Hz, proto je tato konfigurace vzhledem k omezenému úložišti optimální). Tab.?? popisuje nastavení registrů ve funkci `init_400Hz_logger()` třídy MMA8451Q.

Tab. 5.5: Proudová spotřeba modulu RFM95W v LoRa módu

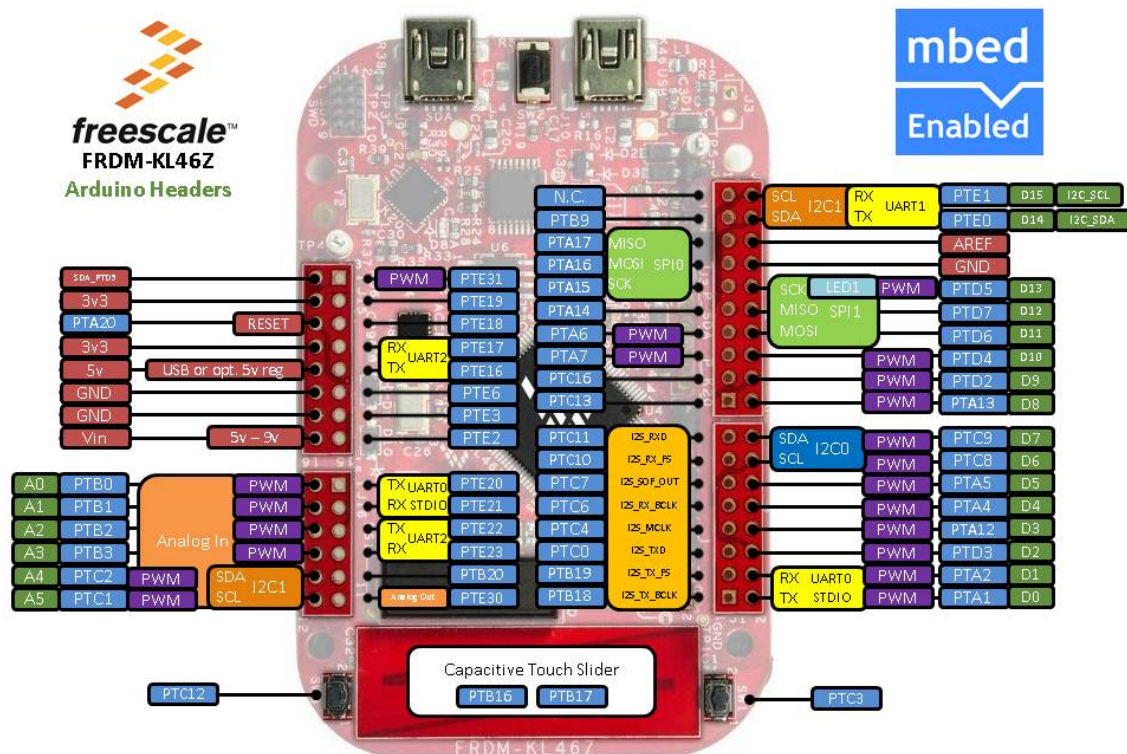
BW [kHz]	I_{Tx} [mA]	I_{Rx} [mA]
7,8	105,136	8,697
10,4	103,457	8,727
15,6	106,319	8,756
20,8	107,192	8,800
31,25	105,022	8,858
41,7	101,470	8,938
62,5	104,344	9,079
125	103,220	9,420
250	100,211	10,178
500	95,100	11,437

Tab. 5.6: Přehled parametrů akcelerometru MMA8451Q

Výrobce	Freescape
Označení	MMA8451Q
Rozměry [mm]	3x3
Rozsahy [g]	±2/±4/±8
ODR [Hz]	1,56 - 800
Spotřeba [μA]	6 - 165
Typické aplikace	Real Time detekce/kompas
Napájecí napětí [V]	1,95 - 3,6
Rozhraní	I2C
Další dispozice	32-bit FIFO Self-test 2 programovatelné interrupt piny

Tab. 5.7: Časové prodlevy ovladače akcelerometru při parametru ODR

ODR [Hz]	Doba trvání isr() [ms]	Doba mezi dvěma interrupty [ms]
100	2,412	326,100
200	2,412	159,730
400	2,412	78,044
800	2,412	36,680



Obr. 5.9: Přehled funkcí jednotlivých pinů FRDMKL46Z [21].

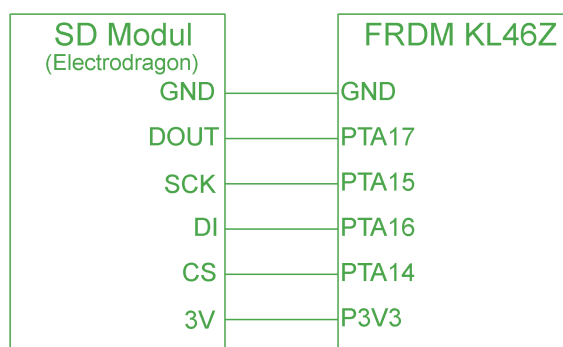
5.3 SD modul

Pro ukládání dat slouží SD modul, který je k vývojové desce připojen přes SPI rozhraní. K ukládání je použita dostupná knihovna SDFFileSystem ([32]). Modul lze napájet 3,3/5V. Schéma propojení SD modulem mikrokontroléru je na Obr.5.11a. Při oživování a testování modulu pro ukládání dat v reálném čase jsme se setkali s nezanedbatelnými zpožděními při zápisu na SD kartu (viz Obr.5.11a). Ideálním řešením tohoto problému by byl kruhový *buffer*, kdy by se data, která se nestihla na kartu zapsat, uchovala v *bufferu* a zápis by proběhl mezi přerušeními v dalším cyklu (zpoždění naznačená na Obr.5.11a se objevovala v intervalech jednotek vteřin), tudíž by bylo možné sbírat data bez ztrát a v reálném čase. Zvolili jsme ale pragmatičtější řešení, a to zápis pevné skupiny vzorků (320 v každé ose akcelerometru, Obr.5.11b). Tímto nebudeme ochuzeni o žádné vzorky ani v případě použití znatelně pomalejší karty, ani o paměť mikrokontroléru. Spotřeba modulu při cyklickém zápisu je 3,765 mA.

Tab. 5.8: Přehled nastvených parametrů akcelerometru MMA8451Q [29]

Adresa	Registr	Hodnota	Poznámka
0x2A	System Control 1 Register ^a	0x09	400 Hz/Active/14-bit mód
0x09	FIFO Setup	0x80	při přetečení zásobníku neakceptuje další vzorky
0x2D	Interrupt Enable	0x40	FIFO interrupt enable
0x2E	Interrupt Configuration	0x40	FIFO interrupt na pinu INT1
0x0E	XYZ Data Configuration	0x01	4g mód/bez HP filtru na vstupu

^a Zde je uvedena hodnota zapsaná do registru na konci funkce (bit Active = 1), během konfigurace ostatních registrů musí být akcelerometr ve Standby módu.



Obr. 5.10: Blokové schéma propojení SD modulu s FRDM-KL46Z.

5.4 Použité harvestery energie a obvody zpracování

Vzhledem k nabídce na trhu byla firma *Mide* jasnou volbou při výběru piezo-harvesteru. Konkrétní typ byl vybrán dle frekvence použití (očekávaný rozsah (20 - 40) Hz), přičemž typ V21BL má výrobce proměřen pro 40 Hz (ostatní mají v manuálu uvedeny charakteristiky pro vyšší frekvence). Při výběru pomocného obvodu přicházel v úvahu některý z obvodů LTC od Linear Technology nebo EH300A od Advanced Linear Devices. Byl vybrán Obvod EH300A, protože při testování obvodu LTC3588 jsme nebyli schopni dosáhnout žádného výstupního signálu, a to i při značných vibracích harvesteru.

5.4.1 Mide 509-V21BL

Výrobce Mide řadu 509 označuje jako *Volture*. Využívá způsob zapouzdrnění, který má Mide patentován. Využívá z obou stran ochrannou vrstvu proti nečistotám a



(a) Ztráta vzorků při zápisu na kartu



(b) Zajištění vzorků v reálném čase

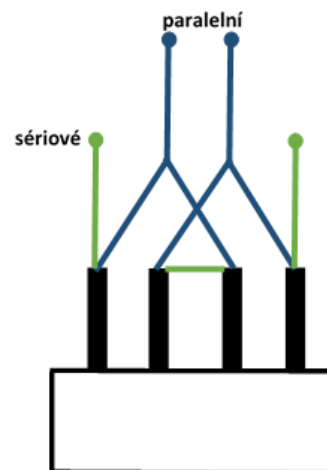
Obr. 5.11: Zápis dat z akcelerometru na SD kartu při ODR 400 Hz

vlhkosti (viz Obr.5.12a). Výrobce uvádí použití v automobilovém průmyslu (TPMS), palivové a olejové senzory a další, vycházející především z filozofie snímačů (možnost nasazení bez přídavného zdroje energie).

Tento využívá piezoelektrický materiál. Obsahuje dva *piezo-wafery*, které lze zapojit dle požadované aplikace (do série pro zvýšení napětí nebo paralelně pro zvýšení výstupního proudu - Obr.5.12b) [24]. Při veškerých dále provedených měřeních jsme používali 4 g závaží (*tip mass*).



(a) Profil [25]



(b) Způsob zapojení

Obr. 5.12: Vibrační harvester Mide V21BL

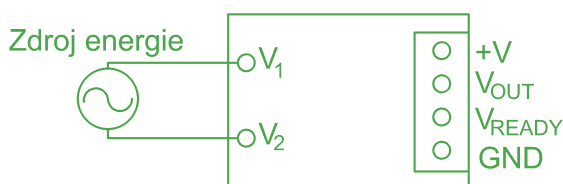
EH300A

Jedná se o modul zpracovávající výstupní napětí z piezo-snímače Mide a zároveň obsahující úložiště energie. Základní parametry jsou uvedeny v Tab.5.9. Slouží

k napájení systémů a obvodů požadující 3,3 V nebo 5 V. Schéma pinů obvodu je na Obr.5.13. Pro nás je použitelný pouze +V a GND pro snímání napětí na kondenzátorech, ostatní dva výstupy V_{READY} a V_{OUT} slouží jako kontrola napájení při použití modulu jako dodatečný zdroj energie.

Tab. 5.9: Přehled parametrů modulu EH300A [30]

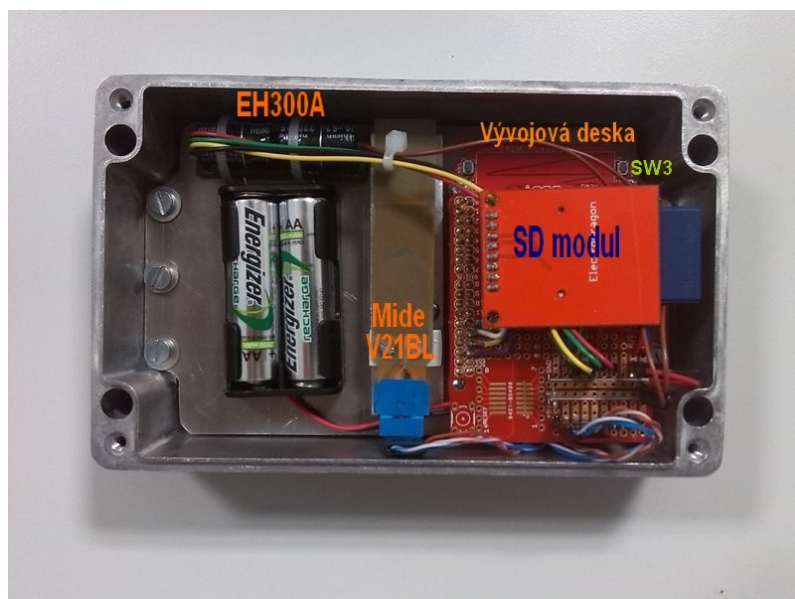
Výrobce	Advanced Linear Devices
Min. vstupní proud [nA]	200
Max. okamžitý vstupní proud [mA]	400
Max. okamžité vstupní napětí [V]	+/-500
Max. výst. proud [A]	1
Max. vst./výst. výkon [mW]	500
Max. ztrátový výkon [μW]	2
Max. výst. úroveň napětí V_H [V]	3,5
Min. výst. úroveň napětí V_L [V]	1,9



Obr. 5.13: Schéma pinů použitého obvodu EH300A

5.5 Výsledné uspořádání modulu

Modul pro měření parametrů harvesteru je na Obr.5.14. Tlačítko *SW3* na vývojovém kitu slouží k ukončení měření (ukončení zápisu na SD kartu). Při odpojení napájení před stiskem SW by došlo ke ztrátě dat. Vytvořili jsme také konfiguraci dle návrhu v kapitole 4 (tedy SD karta na přijímací straně a RFM95W vysílač jako součást modulu). Tuto verzi jsme vytvořili pro demonstraci funkčnosti programového vybavení rádiových modulů v souladu se sběrem dat z akcelerometru (což je pro aplikaci v dopravě při dodatečném napájení vhodnější řešení). Tuto variantu jsme při praktických měřeních nevyužili. Spotřeba proudu při jednotlivých řešeních je v Tab.5.10. Je zřejmé, že pro praktické použití s mobilním způsobem napájení je konfigurace s SD modulem.



Obr. 5.14: Výsledné uspořádání modulu pro záznam dat z harvesteru

5.5.1 Použité napájení

Při měření jsme použili *NiMH* (Nikl Metal Hydridové) baterie, které sice mají menší napětí (1,4 V), ale disponují větší kapacitou než např. alkalické baterie (1900 mAh). S odběrem přes 30 mA nejsme vytvořeným modulem schopni měřit více než tři dny. Při měřeních dlouhodobějšího charakteru bychom tedy museli použít větší typy akumulátorů.

Tab. 5.10: Spotřeba jednotlivých řešení modulu

Konfigurace	Spotřeba [mA]
Vývojová deska SD modul	30 - 35
Vývojová deska RFM95W Tx	90 - 135
Vývojová deska RFM95W Rx SD modul	35 - 40

6 PROVEDENÁ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

6.1 Vztahy a zákonitosti aplikované při srovnání

V našem případě je úložištěm energie kapacitor. Tomu dodává elektrický náboj proud protékající obvodem. Kondenzátor uchovává energii ve formě elektrického pole. Tuto lze vyjádřit vztahem

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad [J; F, V] \quad (6.1)$$

Příkon dodávaný kapacitoru

$$P = \frac{W}{t} \quad [W; J, s] \quad (6.2)$$

Tento lze také vyjádřit v diferenciálním tvaru

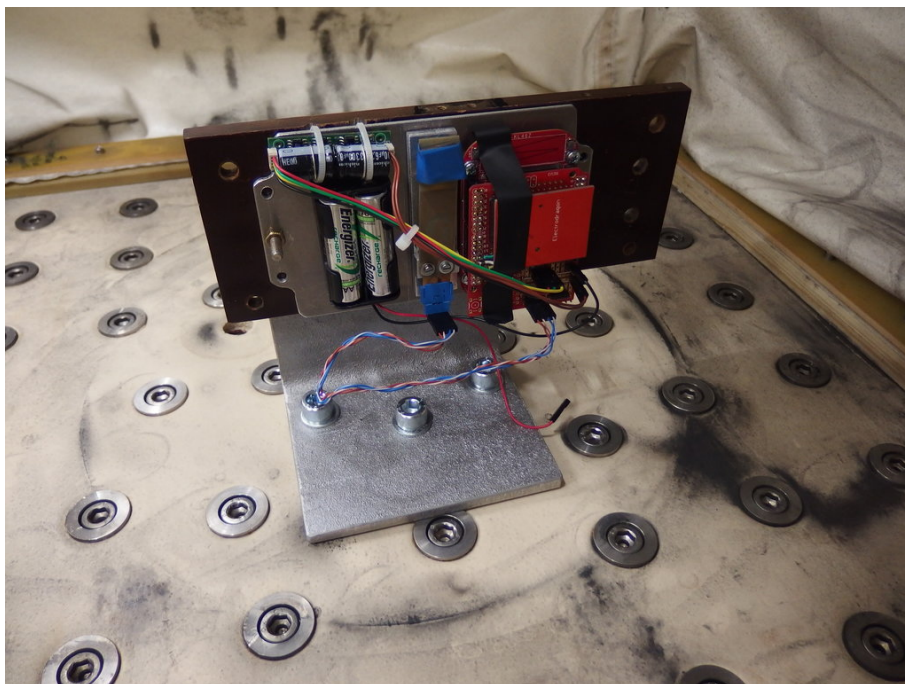
$$p(t) = \frac{dW}{dt} \quad [W; J, s] \quad (6.3)$$

6.2 Referenční měření

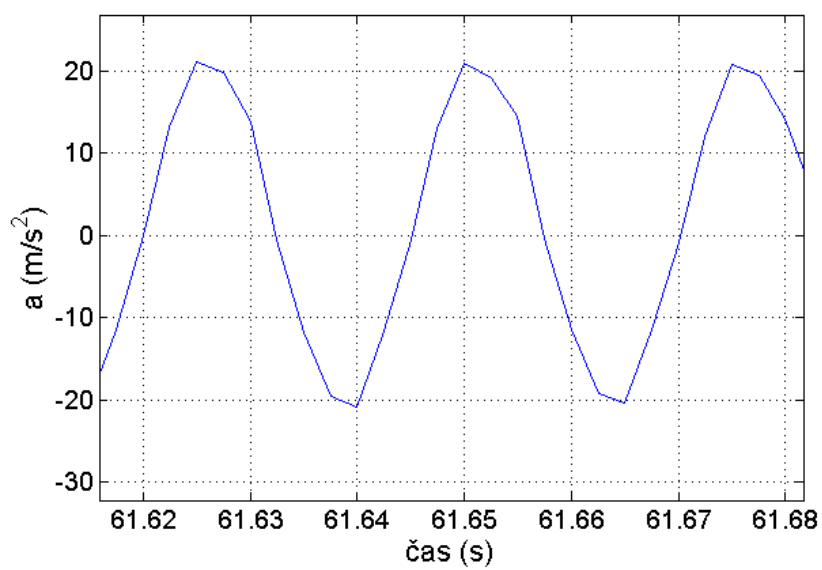
Jedná se o data pro následné srovnání s praktickými průběhy. Pro tento účel jsme využili zkušební laboratoř výzkumného centra CVVOZE pro zkoušky klimatické odolnosti a vibrací. Aby bylo možné určitým způsobem kvalifikovat měření v praxi, musíme zvolit známý průběh vibrací. V našem případě jsme zvolili **sinusový průběh** v konfiguraci s očekávanými frekvencemi a zrychlením v reálném signálu. Umístění přípravku pro měření parametrů vibračního harvesteru na *shakeru* je na Obr.6.1. Příklad průběhu akcelerometru v ose vibrací je na Obr.6.2. Průběhy napětí na kapacitorech při referenčních podmínkách a paralelním zapojení harvesteru jsou na Obr.6.4. Tabulka 6.1 znázorňuje dobu trvání měření a příkon dodaný do kondenzátoru během této doby (nebo do hodnoty nabití; tato hodnota je také znázorněna na Obr.6.4). Z průběhů je zřejmé, že s rostoucí frekvencí při zachování stejného zrychlení je energie dodaná do kapacitorů větší. Na základě průběhů při sériovém a paralelním zapojení harvesteru, které jsou na Obr.6.3 jsme dospěli k závěru, že při použití v praxi je výhodnější použití proudových svorek harvesteru. Podle Tab.6.1¹ ale při vyšších frekvencích (40 Hz) vychází lépe sériové spojení svorek harvesteru. Příklad výpočtu pro Tab.6.1 dosazením do vztahu 6.1 a 6.2 pro Obr.6.4f (40 Hz, 20 ms⁻²):

$$W = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,0003.3,28^2 = 1,614 \text{ mJ} \quad (6.4)$$

¹Porovnáním Obr.6.4 a Tab.6.1 zjistíme, že průměrná hodnota se neshoduje s tabulkou, protože v té jsou data dopočítána „ručně“ primárně kvůli eliminaci špiček v okamžitých hodnotách jak je vidět v dalších průbězích z harvesteru

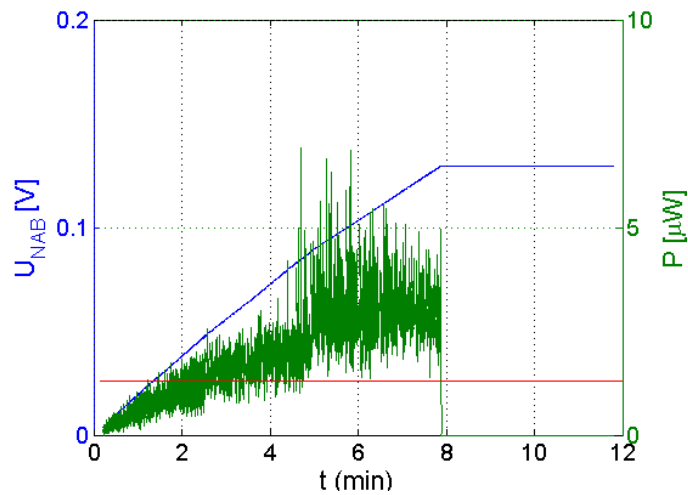


Obr. 6.1: Umístění přípravku ve vibrační komoře

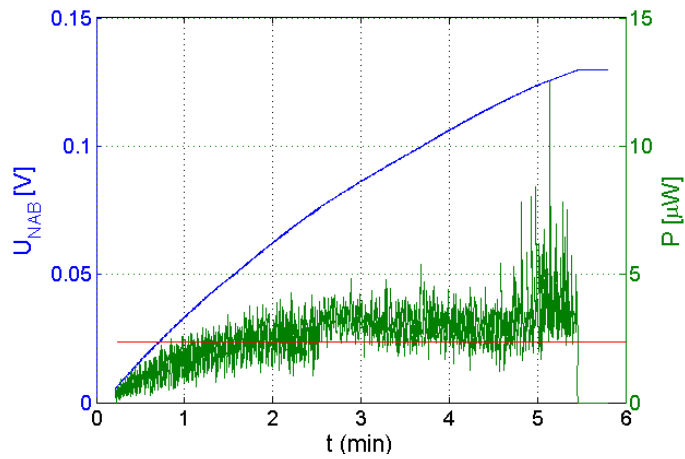


Obr. 6.2: Naměřený průběh zrychlení v ose vibrací při $f = 40 \text{ Hz}$, $a = 20 \text{ ms}^{-2}$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{1,614}{260} = 6,208 \text{ } \mu W \quad (6.5)$$



(a) Sériové spojení svorek



(b) Paralelní spojení svorek

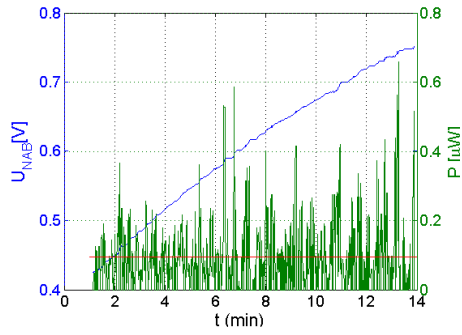
Obr. 6.3: Porovnání průběhů nabíjení kondenzátoru při různém zapojení harvesteru / $f = 30 \text{ Hz}$, $a = 20 \text{ ms}^{-2}$ / # je výkon dodávaný do kondenzátoru, # je průměrná energie, kterou byl kondenzátor nabíjen, # znázorňuje nabíjení kondenzátoru

6.3 Měření v dopravě

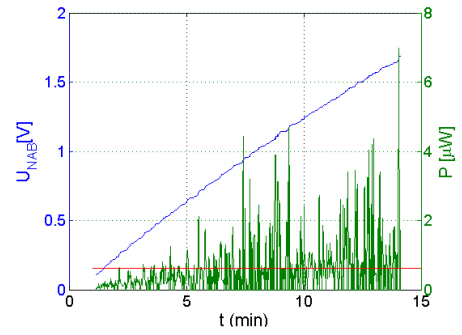
Přestože bychom měli provést měření na nákladních automobilech (kde by měl prototyp vyrobeného modulu s vysílačem největší potenciál použití), provedli jsme z časových důvodů měření v sektoru dopravy osob (automobil, autobus).

6.3.1 Sběr a způsob zpracování dat

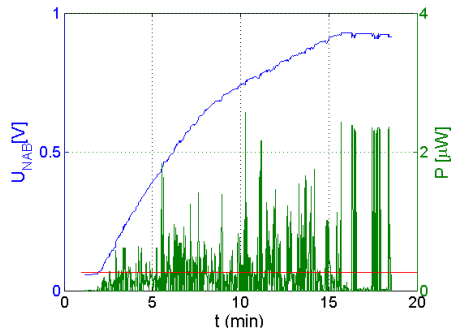
Data akcelerometru jsme získávali ve tvaru $[timFlag, x, y, z]$, kde $timFlag$ je časová značka (v našem případě proměnná celočíselného typu s jednotkou váhy 100 ms) a $x, y,$



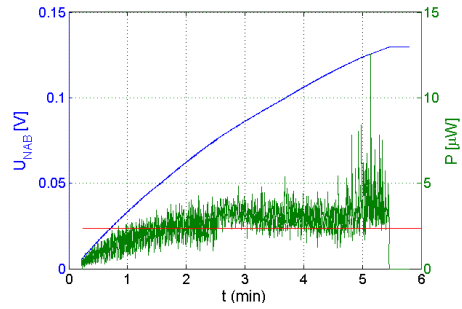
(a) $a = 10 \text{ ms}^{-2}$, $f = 20 \text{ Hz}$



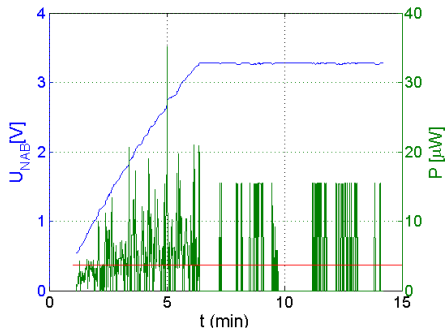
(b) $a = 20 \text{ ms}^{-2}$, $f = 20 \text{ Hz}$



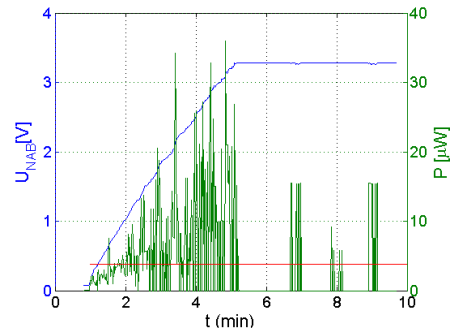
(c) $a = 10 \text{ ms}^{-2}$, $f = 30 \text{ Hz}$



(d) $a = 20 \text{ ms}^{-2}$, $f = 30 \text{ Hz}$



(e) $a = 10 \text{ ms}^{-2}$, $f = 40 \text{ Hz}$



(f) $a = 20 \text{ ms}^{-2}$, $f = 40 \text{ Hz}$

Obr. 6.4: Napětové průběhy nabíjení kapacitoru při referenčních parametrech při paralelním spojení svorek harvesteru / # je výkon dodávaný do kondenzátoru, # je průměrná energie, kterou byl kondenzátor nabíjen, # znázorňuje nabíjení kondenzátoru

z jsou zrychlení v jednotlivých osách. V případě vyčítání hodnot analogových vstupů pomocného obvodu harvesteru jsme použili formát $\{timFlag, procPlusV, procOutV, procReadyV\}$, kde $timFlag$ je zmíněná časová značka a $procPlusV - procReadyV$ jsou hodnoty v % (relativní hodnota vztahená ke 3,6V). K vyhodnocení dat jsme vytvořili funkci v Matlabu, kde se dají data relativně snadno zpracovat. Funkce

Tab. 6.1: Informace o parametrech při referenčním měření při různém zapojení harvesteru

harv. zapojení		paralelní		sériové	
a [ms ⁻²]	f [Hz]	P _C [μW]	t _{MER} [s]	P _C [μW]	t _{MER} [s]
10	20	0,023	816	0,189	856
	30	0,100	1094	0,903	849
	40	4,463	366	24,288	80
20	20	0,489	830	0,841	882
	30	5,950	326	4,104	470
	40	6,208	260	32,364	60

vykreslí průběh zrychlení v jednotlivých osách akcelerometru a z definovaných oblastí vybere pole vzorků, které jsou následně předány interní funkci *fft()* pro vytvoření diskrétní Fourierovy transformace (funkce *Graphs()*). Z dat z EH300A pro vyhodnocení funkce harvesteru je provedeno průměrování dat na časovou jednotku (odstranění nežádoucích výchylek šumového charakteru), aplikován mediánový filtr a ořezání krajních hodnot (které mediánový filtr eliminovat neumí) a výpočet okamžitého příkonu energie do kapacitoru i jeho průměr za dobu měření (skript *FileReading*). Při dlouhodobějších měřeních bychom ale museli použít jiný způsob zpracování dat vzhledem k jejich množství (velikost matice, kde jsou data v Matlabu uchována, je limitována operační paměť počítače).

Při měření jsme použili paralelní zapojení harvesteru, především na základě Obr.6.3.

6.3.2 Zhodnocení

Měření jsme provedli na autobusu a osobním automobilu. Umístění přípravku při měření je na Obr.6.5. Průběhy zrychlení v jednotlivých osách a detailní zobrazení pole vzorků spolu s jejich diskrétní Fourierovou transformací jsou v Příloze B. Data z obvodu harvesteru jsou na Obr.6.6. Tab.6.2 dává bližší informace o energii dodávané do kapacitorů.

Data z akcelerometru - automobil

Data z akcelerometru v případě měření na osobním automobilu jsou v Příloze B.1. V průbězích vzorků v x-ové a y-ové osy dominují frekvence nad 50 Hz. V případě osy z byly dominantní frekvence pod 10 Hz nebo frekvence mimo rozsah vzorkování. Srovnáním energetické bilance v Tab.6.2 a průběhů z harvesteru s referenčními průběhy lze zařadit tyto podmínky do kategorie **nižších frekvencí (pod 20 Hz) se zrychlením pod 10 ms⁻²**.

Data z akcelerometru - Autobus

Data z akcelerometru v případě měření na autobusu jsou v Příloze B.2. Z vizuálního pohledu na časovou závislost zrychlení můžeme vidět že střední hodnota se bude nacházet výše než v případě osobního automobilu. V průbězích vzorků osy x a y dominují frekvence pod 50 Hz. V případě osy z byly dominantní frekvence mimo rozsah měření. Srovnáním energetické bilance v Tab.6.2 a průběhů z harvesteru s referenčními průběhy lze zařadit tyto podmínky do kategorie **nižších frekvencí (pod 20 Hz)** se zrychlením pod 10 ms^{-2} .

6.3.3 Shrnutí harvesterů jako alternativních zdrojů energie

Z našeho měření můžeme vyvodit, že ideálním místem pro umístění přípravku s harvesterem energie je samotné šasi dopravního prostředku (umístění na pevných částech v interiéru je nevhodné - Obr.6.5a). Je také zřejmé, že od tohoto typu alternativního zdroje energie nemůžeme očekávat (při našich okolnostech měření) výrazné zvýšení životnosti zařízení. Praktická aplikace harvesterů by vyžadovala extrémně energeticky úspornou elektroniku (na rozdíl od námi použitého vývojového kitu).

Tab. 6.2: Informace o parametrech při měření v dopravě

Parametr	Auto	Autobus
P_C [nW]	2,916	0,257
t_{MER} [s]	13299	14092
W [μJ]	38,78	3,62

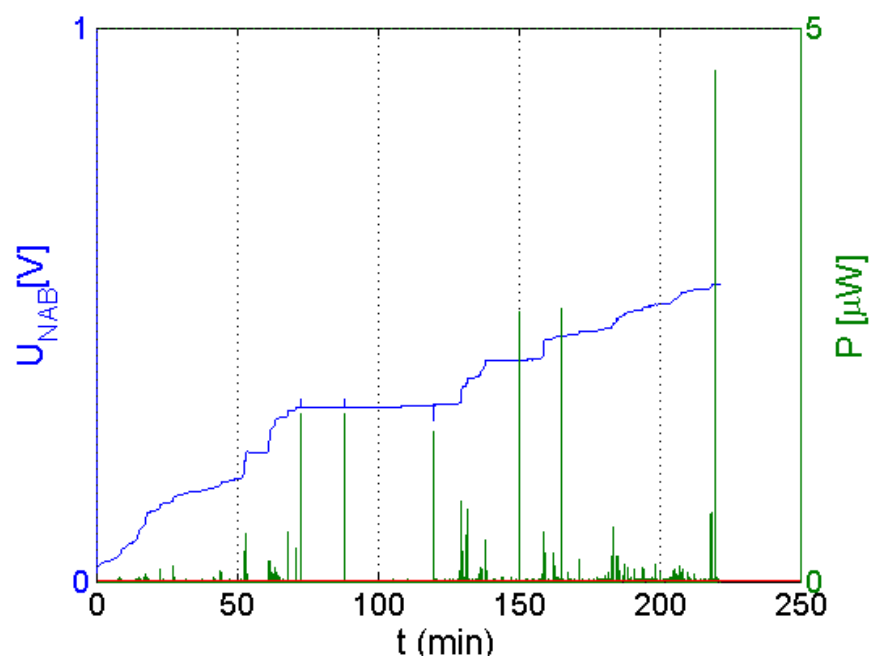


(a) Autobus

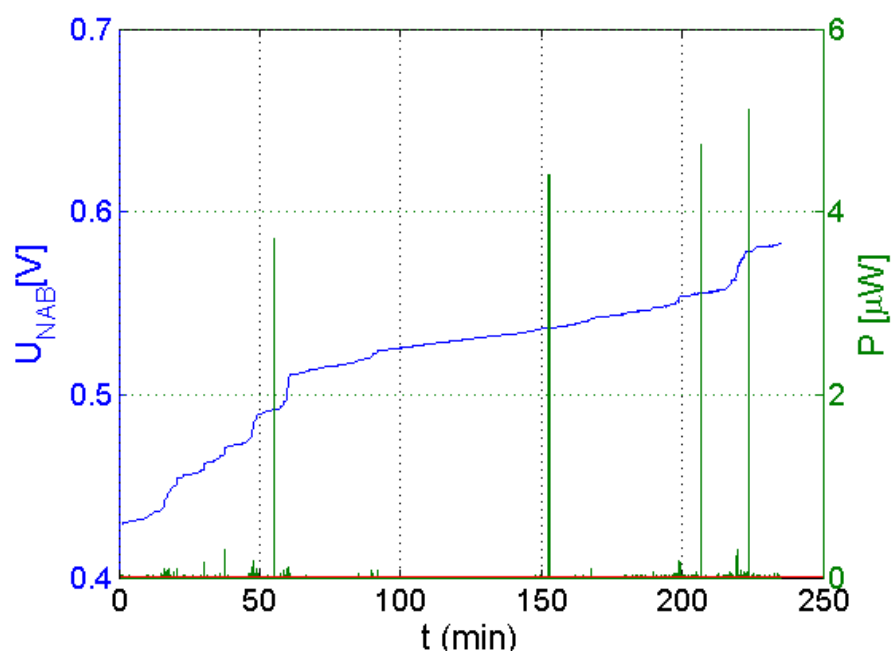


(b) Auto

Obr. 6.5: Umístění přípravku při měření



(a) Osobní automobil



(b) Autobus

Obr. 6.6: Průběhy nabíjení kondenzátoru při měření v dopravě

7 ZÁVĚR

V rámci bezdrátového přenosu byl vytvořen přehled rádiích pracujících v ISM pásmech. Nejprve jsme provedli rozbor a vhodný výběr standardu. Pro předložený rádiový modul je vytvořeno programové vybavení (s použitím dostupné knihovny) a provedeno základní měření. Dále jsme popsali principy harvesterů energie a jejich možnosti.

Na základě těchto informací jsme vytvořili návrh řešení výsledného modulu a následně popis použitých komponent (jejich nastavení, použité módy atp.). Vytvořeným modulem jsme provedli měření na harvesteru energie a MEMS akcelerometru a vyhodnocení naměřených dat. Nakonec jsme shrnuli na základě měření harvester jako alternativní zdroj energie.

LITERATURA

- [1] IEEE 802 Wireless Standards: Fast Reference - Reference from WhatIs.com. ROUSE, Margaret. *Techtarget.com* [online]. 2006 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <<http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/IEEE-802-Wireless-Standards-Fast-Reference>>.
- [2] Wi-Fi. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [2015] [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>>.
- [3] Standards: WAVE / DSRC / 802.11p. WEIGLE, Michele. *Cvt-project.ir* [online]. 2008 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <<http://www.cvt-project.ir/Admin/Files/eventAttachments/109.pdf>>.
- [4] LoRa Network | LoRaWAN Architecture | Radio-Electronics.Com. *Radio-Electronics.Com* [online] [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/lora/lorawan-network-architecture.php>>.
- [5] LoRa RF Interface | Physical Layer | Radio-Electronics.Com. *Radio-Electronics.Com* [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://www.radio-electronics.com/info/wireless/lora/rf-interface-physical-layer.php>>.
- [6] IEEE 802.15.4 Low Power Wireless. *Www.dresden-elektronik.de* [online]. [© 2015] [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://www.dresden-elektronik.de/funktechnik/wireless/ieee802154/?L=1>>.
- [7] GASCÓN, David. Wireless Sensor Networks Research Group. In: *Sensor-networks.org* [online]. 2008 [cit. 2015-01-23]. Dostupné z: <<http://sensor-networks.org/index.php?page=0823123150>>.
- [8] BEDNAŘÍK, Martin. *Návrh paketového analyzátoru pro bezdrátové senzorové sítě založené na standardu IEEE 802.15.4*. Brno, 2011. Diplomová práce.
- [9] Wireless RF Solutions. *Www.semtech.com* [online]. 2014 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.semtech.com/images/mediacenter/collateral/ism_sg.pdf>.
- [10] Wireless Solutions. *Microchip.com* [online]. 2012 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/75027b.pdf>>.

- [11] Wireless Selector Guide. *Www.silabs.com* [online]. 2014 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://www.silabs.com/Marcom\%20Documents/Resources/wireless-selector-guide.pdf>>.
- [12] Wireless Connectivity. *Www.ti.com* [online]. 2014 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://www.ti.com/lit/sg/slab056d/slab056d.pdf>>.
- [13] Melexis: Hall-effect Position Sensors | Sensorless BLDC Motor Drivers. *Www.melexis.com* [online]. 2014 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://www.melexis.com/Products.aspx>>.
- [14] STMicroelectronics. *Www.st.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://www.st.com/web/en/home.html#>>.
- [15] RF Wireless ICs. *Www.micrel.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://www.micrel.com/index.php/products/rf-wireless-ics.html>>.
- [16] RF ICs - HOPE Microelectronics. *Www.hoperf.com* [online]. 2009 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://www.hoperf.com/rf/ic/>>.
- [17] Sub-GHz RF :: NXP Semiconductors. *Www.nxp.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.nxp.com/products/rf/sub_ghz_rf/#products>.
- [18] RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module. *Www.hoperf.com* [online]. 2006 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM95_96_97_98W.pdf>.
- [19] AN1200.19. *Www.semtech.com* [online]. 2014 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.semtech.com/images/datasheet/AN1200.19_SX127x_RefDesign_STD.pdf>.
- [20] Mbed Compiler - Handbook | mbed. *Developer.mbed.org* [online]. [2014] [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://developer.mbed.org/handbook/mbed-Compiler>>.
- [21] FRDM-KL46Z | mbed. *Developer.mbed.org* [online]. [2014] [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://developer.mbed.org/platforms/FRDM-KL46Z/>>.
- [22] HADAS, Zdenek Hadas, Vladislav SINGULE, Jiri KURFUST a Cestmir ONDRUSEK. Artificial intelligence optimizes ambient vibration energy harvesting. *SPIE Newsroom* [online]. 2011, : - [cit. 2015-05-23]. DOI: 10.1117/2.1201107.003683. ISSN 18182259. Dostupné z: <<http://www.spie.org/x51606.xml>>.

- [23] Piezoelektrické jevy. *Fyzika.fs.cvut.cz* [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf>.
- [24] PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTERS. *Www.mide.com* [online]. 2013 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.mide.com/pdfs/Vulture_Datasheet_001.pdf>.
- [25] Piezoelectric-energy-harvester-vibration. *Img.directindustry.com* [online]. [2013] [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/piezoelectric-energy-harvester-vibration-127155-8023822.jpg>.
- [26] Overview of Energy Harvesting Systems (for low-power electronics). *Institute.lanl.gov* [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <https://institute.lanl.gov/ei/_docs/Annual_Workshops/Overview_of_energy_harvesting_systemsLA-UR_8296.pdf>.
- [27] Using the 32 Sample First In First Out (FIFO) in the MMA8451Q. *Www.freescale.com* [online]. 2012 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4073.pdf>.
- [28] Mikroelektronické zdroje energie z okolí – Energy harvesting. HUSÁK, Miroslav. *Www.dps-az.cz* [online]. 2013 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/media/pdf/ukazky/vyvoj_1302.pdf>.
- [29] MMA8451Q 3-Axis, 14-bit/8-bit Digital Accelerometer. *Www.freescale.com* [online]. 2014 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA8451Q.pdf>.
- [30] EH300/301 EPAD ENERGY HARVESTING MODULES. *Aldinc.com* [online]. 2012 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<http://aldinc.com/pdf/EH300ds.pdf>>.
- [31] SX127x - a mercurial repository | mbed. *Developer.mbed.org* [online]. 2014 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <<https://developer.mbed.org/users/dudmuck/code/SX127x/>>.
- [32] SDFFileSystem - a mercurial repository. *Developer.mbed.org* [online]. 2012 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <https://developer.mbed.org/users/mbed_official/code/SDFFileSystem/>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

MEMS Micro-Electro-Mechanical Systems

MCU Mikrokontrolér - Microcontroller Unit

IEEE Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství - Institute of Electrical and Electronics Engineers

WPAN Bezdrátová „osobní“ síť - Wireless Personal Area Network

WMAN Bezdrátová metropolitní síť - Wireless Metropolitan Area Network

WMN Wireless Mesh Network

UWB Širokopásmová síť Ultra - WideBand

ISM Frekvence pro průmysl, vědecké a lékařské účely, bezlicenční pásma - Industrial, Scientific and Medical radio bands

WMSN Bezdrátová síť typu Mesh pro senzory - Wireless Mesh Sensor Network

OSI Propojení otevřených systémů - Open System Interconnection

MAC Řízení přístupu k médiu - Medium Access Control

WAVE Bezdrátová komunikace v dopravě - Wireless Access in Vehicular Environments

ITS Inteligentní transportní systém - Intelligent transportation system

CSMA/CA Metoda vícenásobného přístupu k médiu se zamezením kolize - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

PPDU PHY Protocol Data Unit

DSSS Direct Sequence Spread Spectrum

FSK Klíčování frekvenčním posuvem - Frequency-Shift Keying

PSK Klíčování fázovým posuvem - Phase-Shift Keying

FIFO First In First Out

OQPSK Offset Quadrature Phase-Shift Keying

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

FEC Forward Error Correction

RSSI Indikátor „síly“ přijímaného signálu - Received signal strength indication

BW Šířka pásma - Bandwidth

RF Radio frequency

IO Integrovaný obvod

LoRa Long Range

RKE Remote Keyless Entry system

TPMS Tire-Pressure Monitoring System

SF Spreading factor

SPI Serial Peripheral Interface

nSS Slave Select (aktivní v log.0)

SCK Serial Peripheral Interface

MOSI Master Output Slave Input

MISO Master Input Slave Output ODR

ODR Output Data Rates

I2C Inter-Integrated Circuit

SDA Serial Data Line

SCL Serial Clock Line

GND Ground - Společný potenciál

LSB Least Significant Bit

ACK Acknowledgement

IDE Integrated Development Environment

CVVOZE Centrum pro výzkum a využití obnovitelných zdrojů energie

CRC Cyklický redundantní kód - Cyclic redundancy check

SEZNAM PŘÍLOH

A	Přehled rádiových modulů	58
A.1	Semtech	58
A.2	Microchip	61
A.3	Silicon Labs	63
A.4	Texas Instruments	65
B	Naměřené hodnoty	67
B.1	Osobní automobil	67
B.2	Autobus	77

A PŘEHLED RÁDIOVÝCH MODULŮ

A.1 Semtech

Označení	Pouzdro	Rozměry [mm]	Typ	Frekvence [MHz]	BW (FSK/OOK) [kHz]	Bezp.	Bit rate (FSK/OOK/L oRa) [kbps]	Modulace	Rozhraní	Napájecí napětí [V]	RSSI d. rozsah [dB]	Sleep mode [µA]	Tx proud [mA]	Rx proud [mA]	Tx Výkon [dBm]	Rx [dBm] (FSK/OOK) Sensitivity	Poznámky
SX1213	TQFN-32	5x5	Rx	300 - 510	250/400	-	200/32	FSK/OOK	SPI	2,1 - 3,7	70	0,1	-	3	-	-104/-110	Kompatibilní s sx1272
SX1239	QFN24	5x5	Rx	290 - 340 424 - 510 862 - 1020	500/250	AES-128	300/32,768	FSK,GFSK, MSK,GMSK/ OOK	SPI	1,8 - 3,6	115+	0,1	-	16	-	-120/-112	Wireless M-BUS
SX1223	TQFN24	4x4	Tx	425 - 475 850 - 950	-	-	153,6	2Level FSK	SPI	2,0 - 3,6	-	0,3	25,8	-	10	-	-
SX1230	MLPQ-24	4x4	Tx	290 - 340 431 - 510 862 - 1020	-	-	600/32	FSK,GFSK,M SK,GMSK,O OK	SPI	1,8 - 3,7	-	0,5	95	-	17	-	není potřeba MCU (stand alone), Aktiv.RFID, RKE
SX1240	SOIC8-EP	6x5	Tx	434 868	-	-	100/10	2Level FSK/OOK	TWI	1,8 - 3,7	-	0,5	16,5	-	10	-	není potřeba MCU, Aktiv.RFID, RKE
SX1242	SOIC8-EP	6x5	Tx	344,94	-	-	10	OOK	- (Data/TxEN)	1,8 - 3,7	-	0,5	22	-	12	-	není potřeba MCU, RKE
SX1243	DFN-UT8	3,1x2,1	Tx	310 - 450 860 - 870 902 - 928	-	-	100/10	OOK/FSK FHSS	TWI	1,8 - 3,7	-	0,125	17,5	-	10	-	vhodné pro otevírání garáž. Vrat, RKE
SX1211	TQFN-32	5x5	Rx/Tx	863 - 870 902 - 928 950 - 960	250 / 400	-	200/32	FSK/OOK	SPI	2,1 - 3,6	70	0,1	30	3,5	12,5	-107/-113	-
SX1212	TQFN-32	5x5	Rx/Tx	300 - 510	250/400	-	150/32	FSK/OOK	SPI	2,1 - 3,6	70	0,1	30	3,5	12,5	-104/-110	-
SX1231	QFN24	5x5	Rx/Tx	290 - 340 424 - 510 862 - 1020	500	AES - 128	300/32,768	FSK,GFSK,M SK,GMSK,O OK	SPI	1,8 - 3,6	115+	0,1	95	16	17	-120/-112	Wireless M-BUS
SX1231H	QFN24	5x5	Rx/Tx	290 - 340 431 - 510 862 - 1020	500	AES - 128	300/32,768	FSK,GFSK,M SK,GMSK,O OK	SPI	2,4 - 3,6	115+	0,1	130	16	20	-120/-112	Wireless M-BUS
SX1231J	QFN24	5x5	Rx/Tx	424 - 510 862 - 1020	500	AES - 128	300/32,768	FSK,GFSK,M SK,GMSK,O OK	SPI	1,8 - 3,6	115+	0,1	95	16	17	-120/-112	RKE, Intelig. Měř. a IEEE15.4d/g, Aktiv. RFID
SX1232	QFN24 / QFN28	5x5/6x6	Rx/Tx	862 - 1020	250	-	300/32,768	FSK,GFSK,M SK,GMSK,O OK	SPI	1,8 - 3,7	127	0,1	125	9,3	20	-119/-117	-
SX1233	QFN24	5x5	Rx/Tx	290 - 340 424 - 510 862 - 1020	500	AES - 128	600/32,768	FSK,GFSK,M SK,GMSK,O OK	SPI	1,8 - 3,6	115+	0,1	95	16	17	-118/-112	-
SX1235	QFN24	5x5	Rx/Tx	862 - 1020	250	-	300/32,768	FSK,GFSK,M SK,GMSK,O OK	SPI	1,8 - 3,7	115+	0,1	125	9,3	20	-119/-117	spolehlivé M2M
SX1257	MLPQW-32	5x5	Rx/Tx	862 - 1020	750	-	-	FSK,OFDM, QPSK (SW)	SPI	2,7 - 3,6	Nemá	0,5	85	25	8	-	IEEE 802.15.4g SUN Multi-PHY Mode Smartgrid, SDR

SX1236	QFN28	6x6	Rx/Tx	137 - 175 410 - 525 862 - 1020	250	-	300/32,768	FSK,GFSK,MSK,GMSK,OOK	SPI	1,8 - 3,7	127	0,2	120	12	20	-121/-117	WMBus, IEEE802.15.4g
SX1238	MLPQ40	5x7	Rx/Tx	863 - 928	250	-	300/32,768	FSK,GFSK,MSK,GMSK,OOK	SPI	2,7 - 3,6	115+	1,1	408	25,3	27	-124 /-121	-
SX1272/73	QFN28	6x6	Rx/Tx	860 - 1020	250	-	300/32,768	FSK,GFSK,MSK,GMSK,LoRaTM,OOK	SPI	1,8 - 3,7	127	0,1	125	11,2	20	-119/-123	WMBus, IEEE802.15.4g, LoRa
SX1276 SX1277 SX1278	QFN28	6x6	Rx/Tx	137 - 175 410 - 525 862 - 1020	250	-	300/32,768/ 37,5	FSK,GFSK,MSK,GMSK,LoRaTM,OOK	SPI	1,8 - 3,7	127	0,2	120	12	20	-121/-117	WMBus, IEEE802.15.4g, LoRa
SX1279	QFN28	6x6	Rx/Tx	137 - 160 410 - 480 779 - 960	250	-	300/32,768/ 37,5	FSK,GFSK,MSK,GMSK,LoRaTM,OOK	SPI	1,8 - 3,7	127	0,2	120	12	20	-121/-117	WMBus, IEEE802.15.4g, LoRa

A.2 Microchip

Označení	Pouzdro	Rozměry [mm]	Typ	Frekvence [MHz]	BW (FSK/OOK) [kHz]	Bezp.	Bit rate (FSK/OOK) [kbps]	Modulace	Rozhraní	Napájecí napětí [V]	RSSI d. rozsah [dB]	Sleep mode [μA]	Tx proud [mA]	Rx proud [mA]	Tx Výkon [dBm]	Rx [dBm] (FSK/OOK) Citlivost	Poznámky
MRF89XA	TQFN-32	5x5	Rx/Tx	863 - 870 902 - 928 950 - 960	250/400	-	200/32	FSK/OOK	SPI	2,1 - 3,6	70	0,1	30	3,5	12,5	-107/-113	-
MRF49XA	TSSOP-16	6,4x5	Rx/Tx	434 868 915	400	-	256	FSK/FHSS	SPI	2,2 - 3,8	46	0,3	28	15	7	-112	RKE
rfRXD0420	LQFP-32	7x7	Rx	300 - 450	150	-	80/40	ASK/FSK	-	2,7 - 5,5	70	0,1	-	10	-	-111/-109	RKE, kompatibilní s rfPIC
rfRXD0920	LQFP-32	7x7	Rx	800 - 930	150	-	80/40	ASK/FSK	-	3,3 - 5,5	70	0,1	-	11	-	-109/-108	RKE, kompatibilní s rfPIC

A.3 Silicon Labs

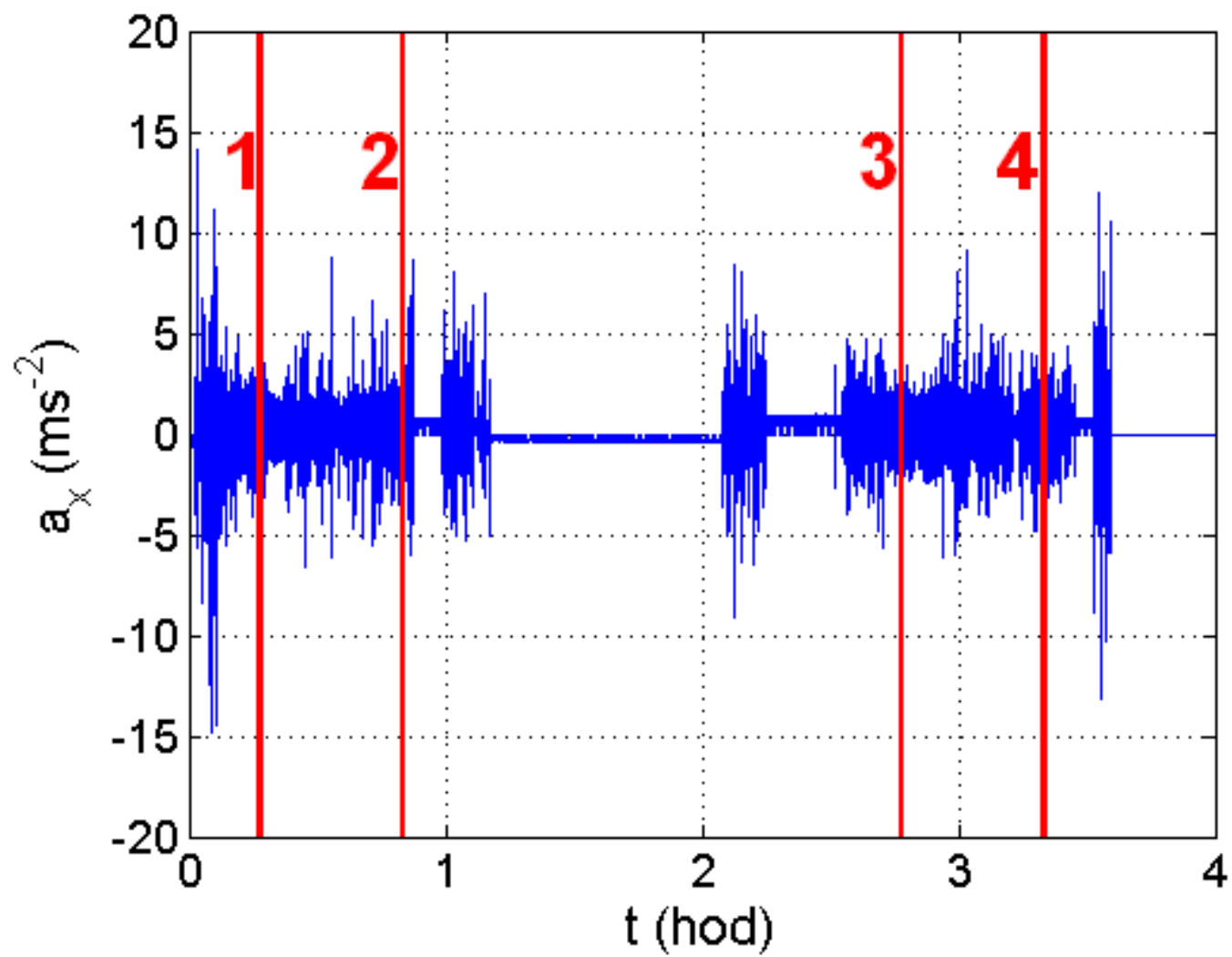
Označení	Pouzdro	Rozměry [mm]	Typ	Frekvence [MHz]	BW (FSK/OOK) [kHz]	Bezp.	Bit rate (FSK/OOK) [kbps]	Modulace	Rozhraní	Napájecí napětí [V]	RSSI d. rozsah [dB]	Sleep mode [µA]	Tx proud [mA]	Rx proud [mA]	Tx Výkon [dBm]	Rx [dBm] (FSK/OOK) Citlivost	Poznámky	
Si4012	MSOP-10	4,9x3	Tx	27 - 960	-	-	100/50	FSK/OOK	SMB	1,8 - 3,6	-	0,6	19,8	-	10	-	Wireless M-BUS T1 Mode	Universal ISM Band RF ICs
Si4313	QFN-20	4x4	Rx	240 - 960	620	-	256/40	FSK,GFSK,OK	SPI	1,8 - 3,6	20	1	-	18,5	-	-118/-107	-	
Si4355	QFN-20	3x3	Rx	283 - 350 425 - 525 850-960	850	-	500/120	FSK,GFSK,OK	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,05	-	10	-	-116/-113	-	
Si4356	QFN-20	3x3	Rx	315 - 917	535	-	120/120	FSK,GFSK,OK	- poloviční	1,8 - 3,6	Nemá	0,05	-	12	-	-113/-111	RKE, není potřeba MCU	
Si4455	QFN-20	3x3	Rx/Tx	283 - 350 425 - 525 850 - 960	850	-	500/120	FSK,GFSK,OK	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,05	30	10	13	-116/-113	RKE	
Si4030	QFN-20	4x4	Tx	900 - 960	Neuv	-	256/40	FSK,GFSK,OK	SPI	1,8 - 3,6	-	1	85	-	20	-	RKE	Enhanced Feature Universal ISM Band RF ICs
Si4031 Si4032	QFN-20	4x4	Tx	240 - 930	Neuv	-	256/40	FSK,GFSK,OK	SPI	1,8 - 3,6	-	1	85	-	20	-	RKE	
Si4060	QFN-20	4x4	Tx	284 - 350 420 - 525 850 - 1050	Neuv	-	1000/120	(G)FSK, 4(G)FSK,(G) MSK,OOK	SPI	1,8 - 3,6	-	0,05	85	-	13	-	kompatibilní s IEEE 802.15.4g , RKE	
Si4063	QFN-20	4x4	Tx	284 - 350 420 - 525 850 - 1050	Neuv	-	1000/120	(G)FSK, 4(G)FSK,(G) MSK,OOK	SPI	1,8 - 3,6	-	0,05	85	-	20	-	kompatibilní s IEEE 802.15.4g, RKE	
Si4330	QFN-20	4x4	Rx	240 - 960	620	-	256/40		SPI	1,8 - 3,6	20	0,45	-	18,5	-	-121/-110	RKE	
Si4362	QFN-20	4x4	Rx	142 - 175 284 - 350 420 - 525 850 - 1050	850	-	1000/120	(G)FSK, 4(G)FSK,(G) MSK,OOK, ASK	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,05	-	13,7	-	-126/-110	RKE	
Si4430	QFN-20	4x4	Rx/Tx	900 - 960	620	-	256/40	FSK, GFSK, OOK	SPI	1,8 - 3,6	20	0,45	85	18,5	20	-121/-110	RKE, TPM	
Si4431 Si4432	QFN-20	4x4	Rx/Tx	240 - 930	620	-	256/40	FSK, GFSK, OOK	SPI	1,8 - 3,6	20	0,45	85	18,5	20	-121/-110	RKE, TPM	
Si4438	QFN-20	4x4	Rx/Tx	425 - 525	850	-	500/120	FSK, GFSK, OOK	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,05	75	14	20	-124/-108	-	
Si4460	QFN-20	4x4	Rx/Tx	142 - 175 284 - 350 420 - 525 850 - 1050	850	-	1000/120	(G)FSK,4(G) FSK,(G)MSK, OOK (G)FSK,	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,05	18	13,7	13	-126/-110	Inteligentní měření 802.15.4g & Mbus, RKE	
Si4461	QFN-20	4x4	Rx/Tx	142 - 175 284 - 350 420 - 525 850 - 1050	850	-	1000/120	(G)FSK,4(G) FSK,(G)MSK, OOK (G)FSK,	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,05	43	13,7	16	-126/-110	Inteligentní měření 802.15.4g & Mbus, RKE	
Si4463	QFN-20	4x4	Rx/Tx	142 - 175 284 - 350 420 - 525 850 - 1050	850	-	1000/120	(G)FSK,4(G) FSK,(G)MSK, OOK (G)FSK,	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,05	85	13,7	20	-126/-110	Inteligentní měření 802.15.4g & Mbus, RKE	
Si4464	QFN-20	4x4	Rx/Tx	119 - 159 177 - 319 353 - 639 705 - 960	850	-	1000/120	(G)FSK,4(G) FSK,(G)MSK, OOK (G)FSK,	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,05	85	13,7	20	-126/-110	Inteligentní měření 802.15.4g & Mbus, RKE	
Si4420	TSSOP-16	6,4x5	Rx/Tx	315/433/ 868/915	450	-	256	FSK	SPI	2,2 - 5,4	46	0,3	26	15	8	-109	RKE	

A.4 Texas Instruments

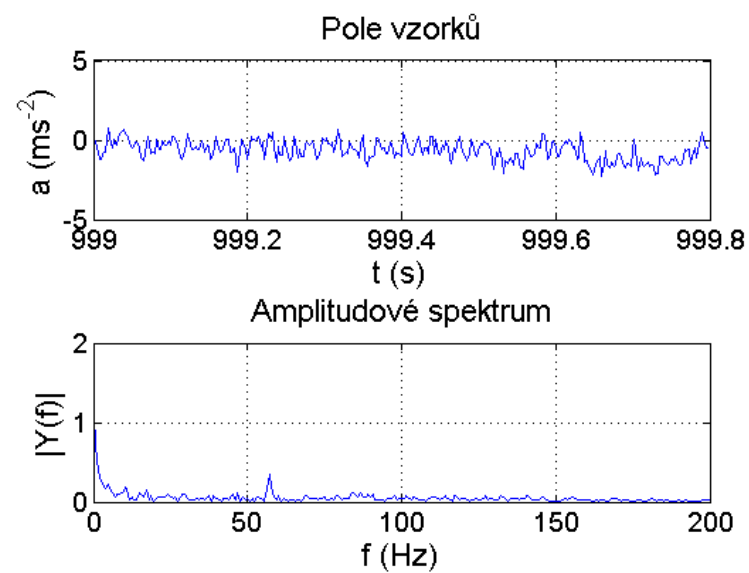
Označení	Pouzdro	Rozměry [mm]	Typ	Frekvence [MHz]	BW (FSK/OOK) [kHz]	Bezp.	Bit rate (FSK/OOK) [kbps]	Modulace	Rozhraní	Napájecí napětí [V]	RSSI d. rozsah [dB]	Sleep mode [μA]	Tx proud [mA]	Rx proud [mA]	Tx Výkon [dBm]	Rx [dBm] (FSK/OOK) Citlivost	Poznámky
CC1100	QLP-20	4x4	Rx/Tx	300 - 348 400 - 464 800 - 928	812	-	500/250	2FSK,GFSK, MSK,OOK,A SK	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,4	31,1	16,4	10	-111/-86	-
CC1101	QLP-20	4x4	Rx/Tx	300 - 348 387 - 464 779 - 928	812	-	500/250	2FSK,4FSK,G FSK,MSK,OO K,ASK	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,2	34,2	16,5	12	-111	použ. pro bezdrát. sítě IEEE 802.15.4g
CC11x1-Q1	QFN-32	5x5	Rx/Tx	310 - 348 420 - 450 779 - 928	812	-	250	2FSK,GFSK, MSK,OOK,A SK	SPI	1,8 - 3,6	17	5	35,5	22,2	12,5	-114/-109	TPMS, RKE, Automotive; cc1121/31/51
CC1150	QLP-16	4x4	Tx	300 - 348 400 - 464 800 - 928	500	-	500/250	2FSK,GFSK, MSK,ASK, OOK	SPI	1,8 - 3,6	-	0,2	29,3	-	10	Neuv	RKE
CC1190	QFN-16	4x4	Rx/Tx	850 - 950	Neuv	-	Neuv	-	-	2 - 3,7	Nemá	-	302	26	27,7	Neuv	slouží pro zvětšení rozsahu jiných RF rádií
CC1120	QFN-32	5x5	Rx/Tx	164 - 192 410 - 480 820 - 960	200	-	200	2FSK,2GFSK,4 FSK,4GFSK,M SK,OOK	SPI	2 - 3,6	Neuv	0,12	54	23	16	-127	Systémy IEEE 802.15.4g, Aktivní RFID
CC1125	QFN-32	5x5	Rx/Tx	164 - 192 410 - 480 820 - 960	250	-	200	2FSK,2GFSK,4 FSK,4GFSK,M SK,OOK	SPI	2 - 3,6	Neuv	0,3	56	27	16	-129	Systémy IEEE 802.15.4g, Aktivní RFID, podp. CC1190
CC1175	QFN-32	5x5	Tx	164 - 192 410 - 480 820 - 960	Neuv	-	200	2FSK,2GFSK,4 FSK,4GFSK,M SK,OOK	SPI	2 - 3,6	-	0,12	54	-	16	-	Systémy IEEE 802.15.4g, Aktivní RFID
CC1200	QFN-32	5x5	Rx/Tx	164 - 190 410 - 475 820 - 950	1600	AES-128	1250	2FSK,2GFSK,4 FSK,4GFSK,M SK,OOK	SPI	2 - 3,6	Neuv	0,12	54	23,5	16	-123	Systémy IEEE 802.15.4g, Aktivní RFID, W-MBUS
CC110L	QLP-20	4x4	Rx/Tx	300 - 348 387 - 464 779 - 928	812	-	500/250	2FSK,4FSK,G FSK,MSK,OO K	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,2	34,2	17,1	12	-113	podp. Cc1190
CC113L	QLP-20	4x4	Rx	300 - 348 387 - 464 779 - 928	812	-	500/250	2FSK,4FSK,G FSK,MSK,OO K	SPI	1,8 - 3,6	Neuv	0,2	-	17,1	-	-116	-
CC115L	QLP-20	4x4	Tx	300 - 348 387 - 464 779 - 928	Neuv	-	500/250	2FSK,4FSK,G FSK,OOK	SPI	1,8 - 3,6	-	0,2	33,4	-	12	-	Aktivní RFID

B NAMĚŘENÉ HODNOTY

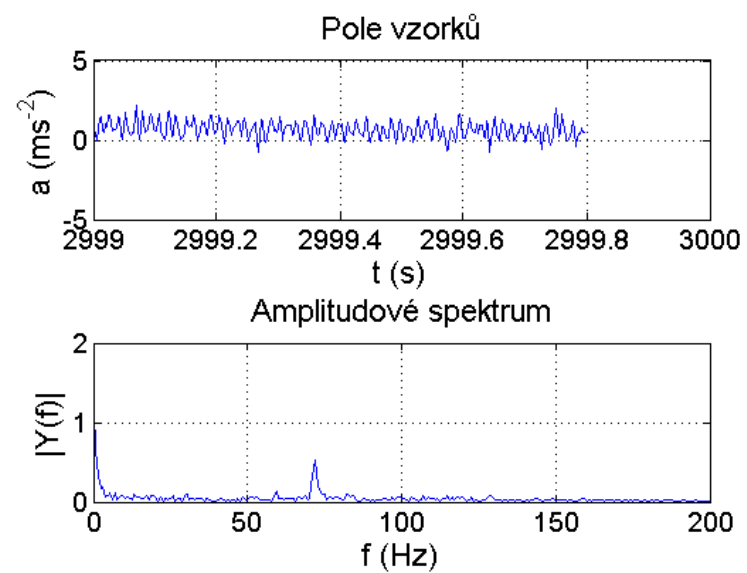
B.1 Osobní automobil



Obr. B.1: Přehled profilu zrychlení v x-ové ose.

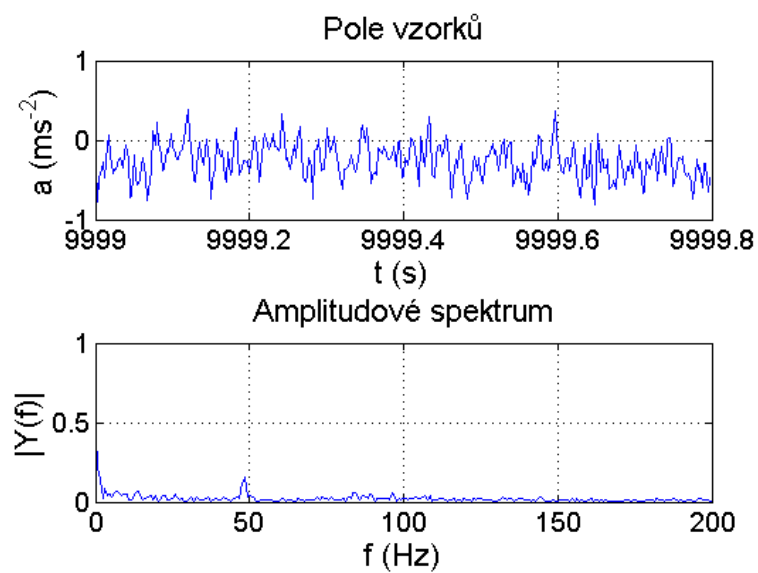


(a) Vzorky 1 v ose X

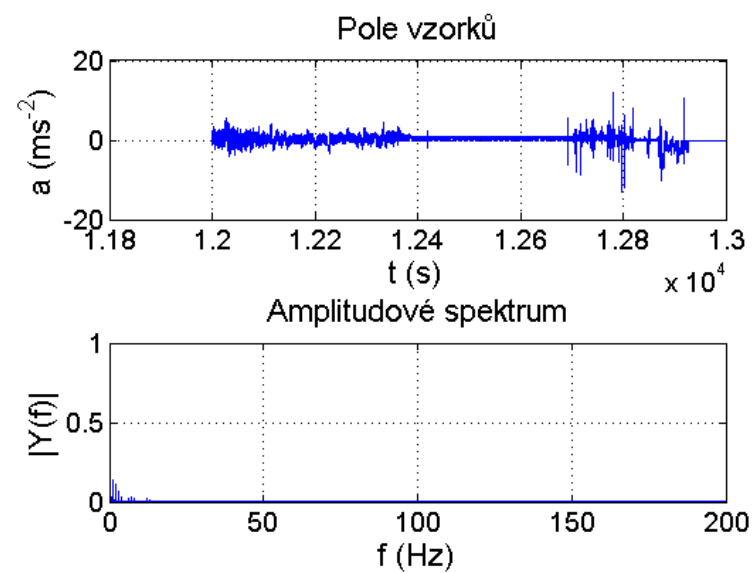


(b) Vzorky 2 v ose X

Obr. B.2: Grafické průběhy a FFT pole vzorků

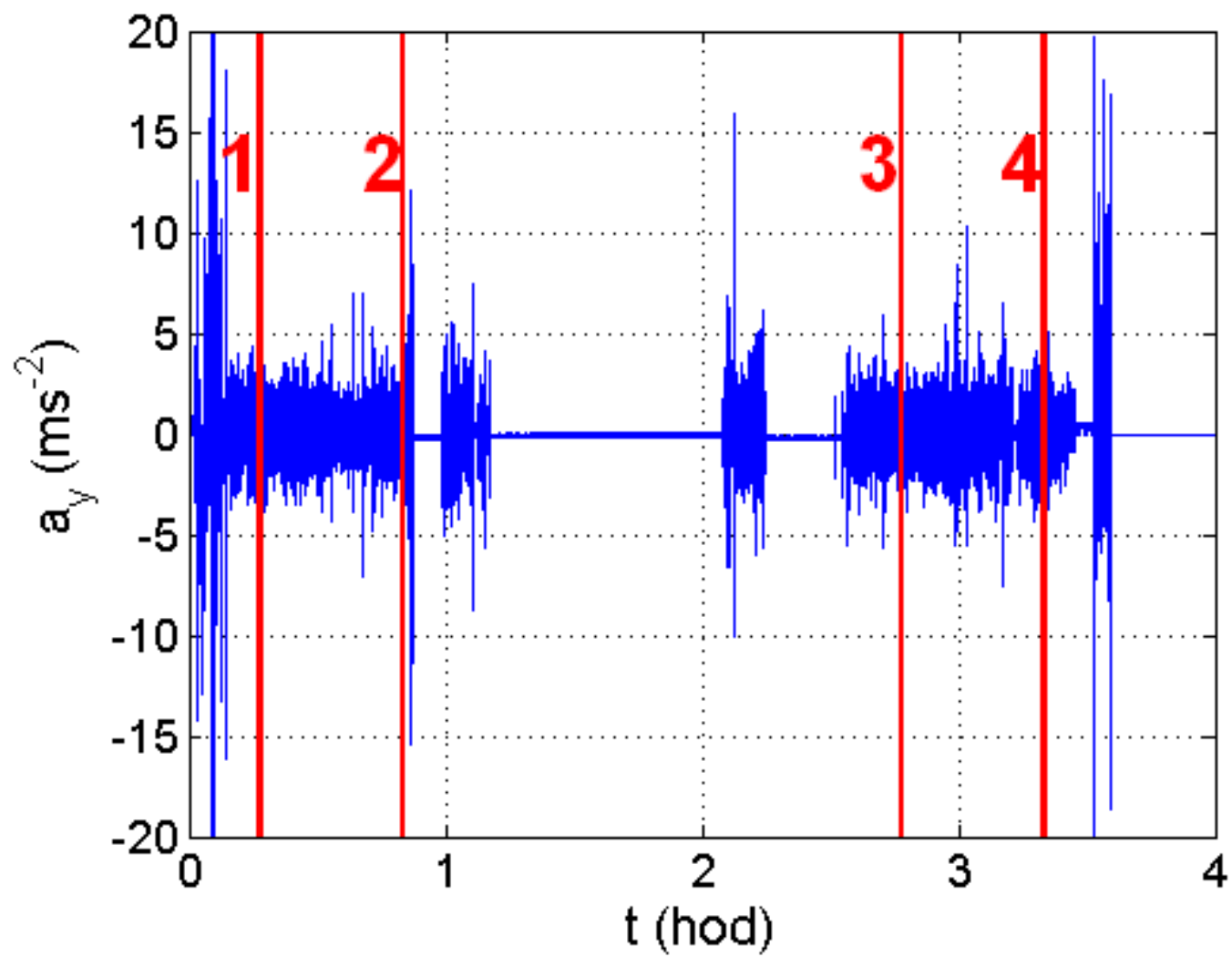


(a) Vzorky 3 v ose X

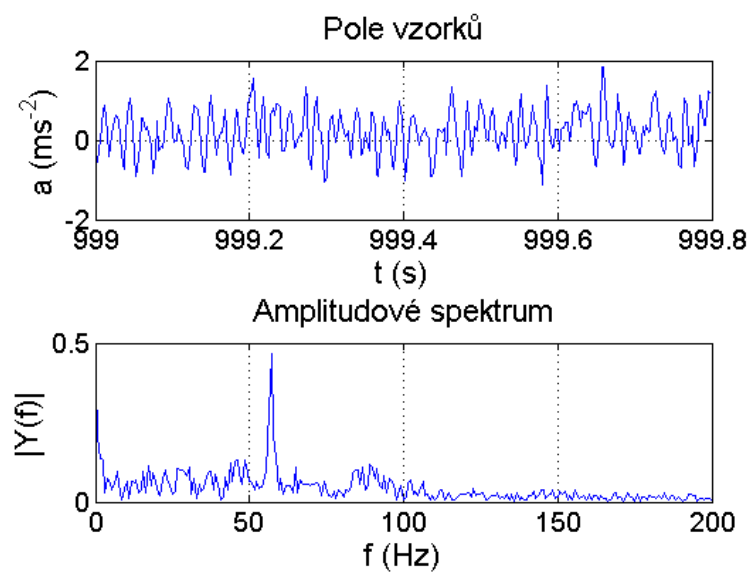


(b) Vzorky 4 v ose X

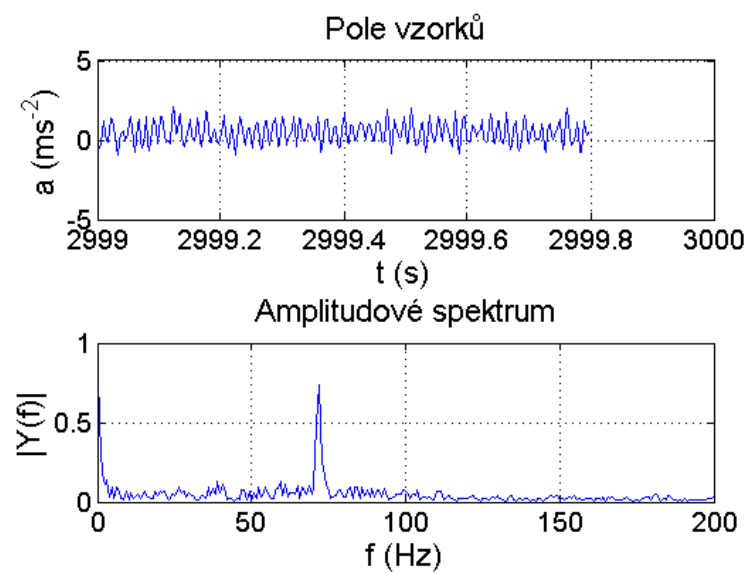
Obr. B.3: Grafické průběhy a FFT pole vzorků



Obr. B.4: Přehled profilu zrychlení v y-ové ose.

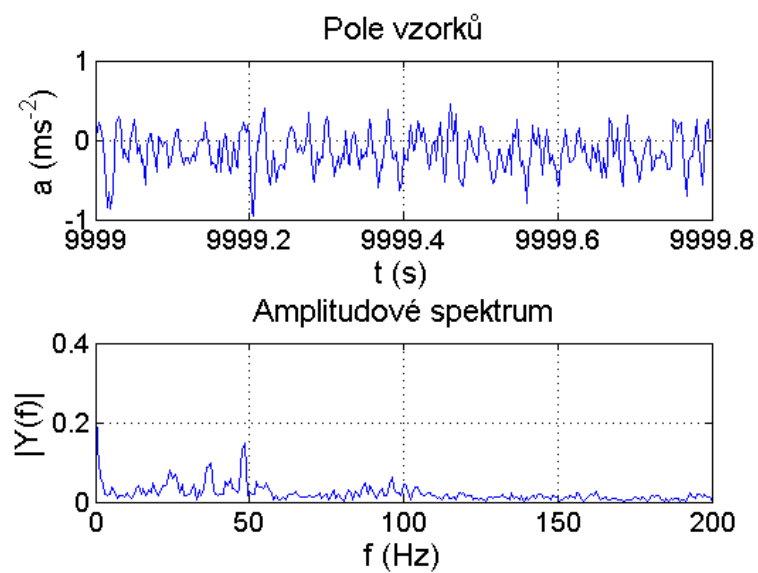


(a) Vzorky 1 v ose Y

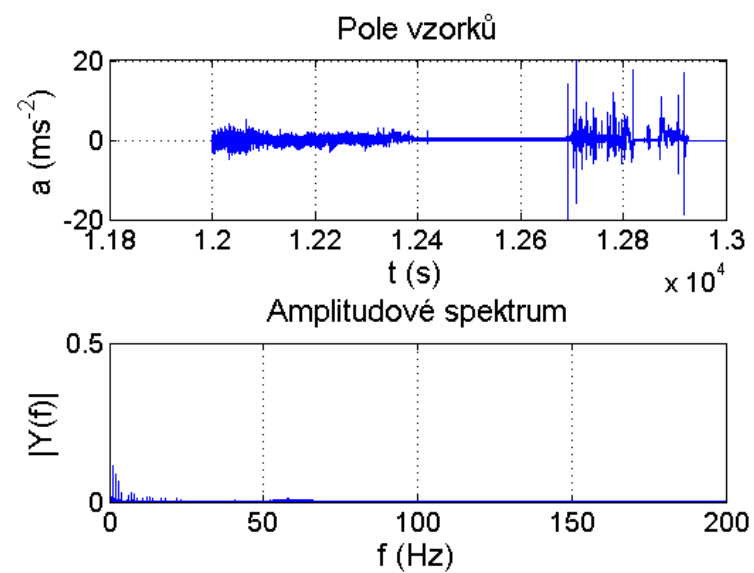


(b) Vzorky 2 v ose Y

Obr. B.5: Grafické průběhy a FFT pole vzorků

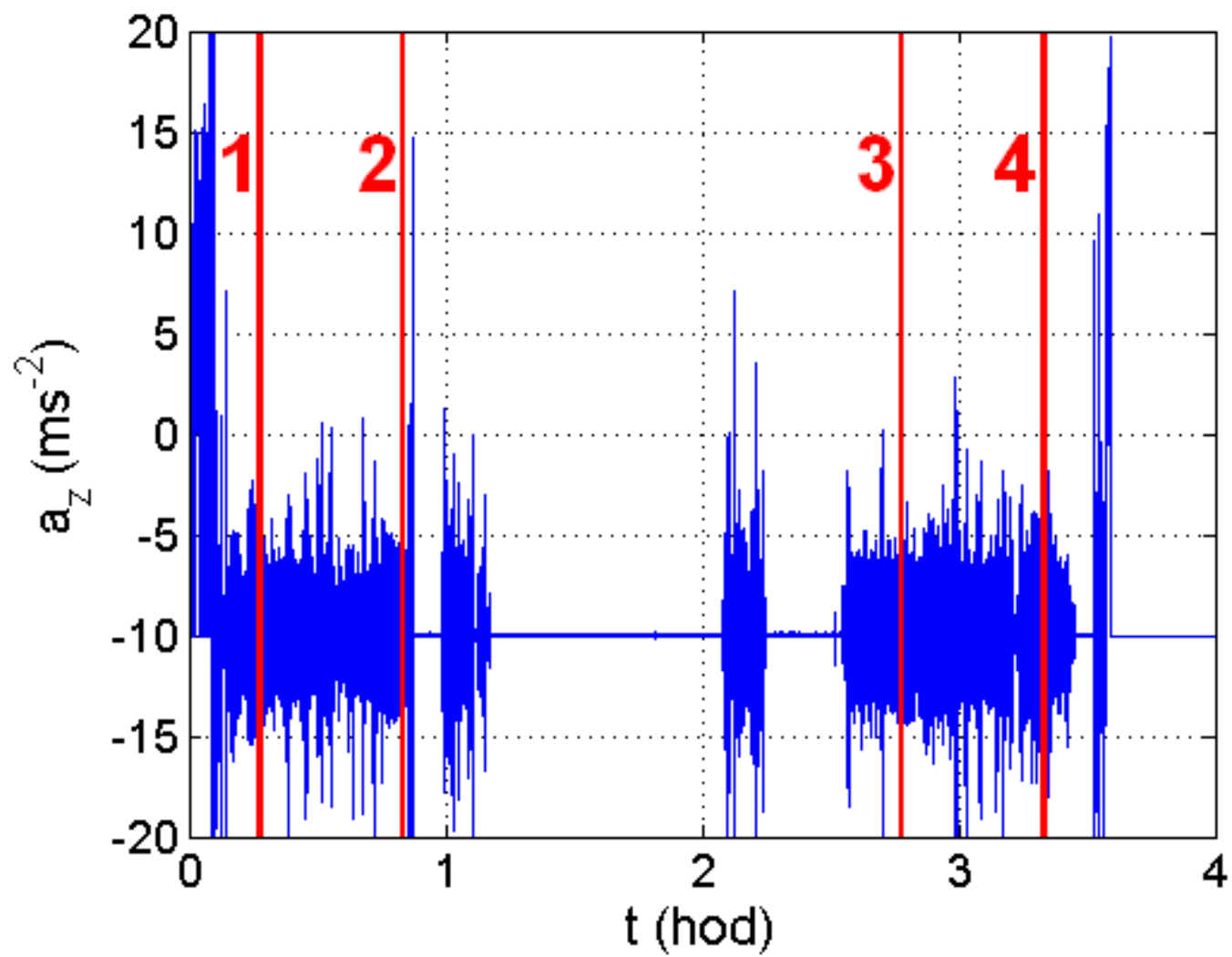


(a) Vzorky 3 v ose Y

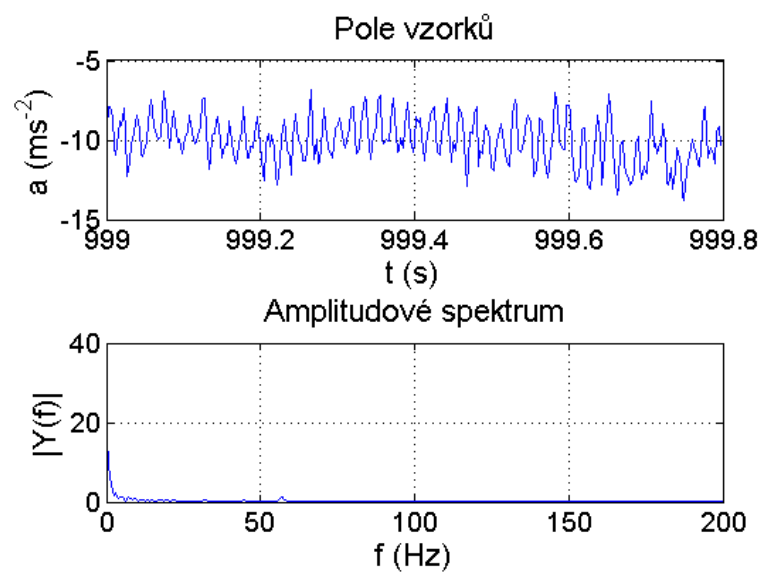


(b) Vzorky 4 v ose Y

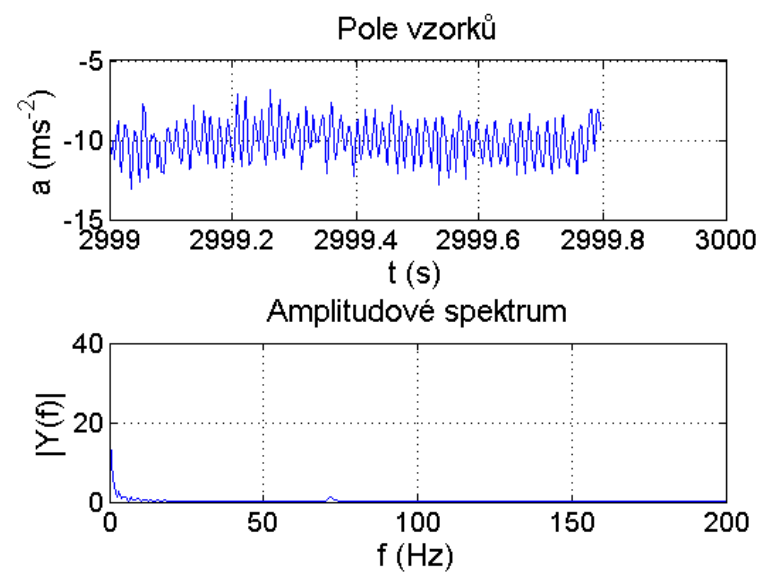
Obr. B.6: Grafické průběhy a FFT pole vzorků



Obr. B.7: Přehled profilu zrychlení v z-ové ose.

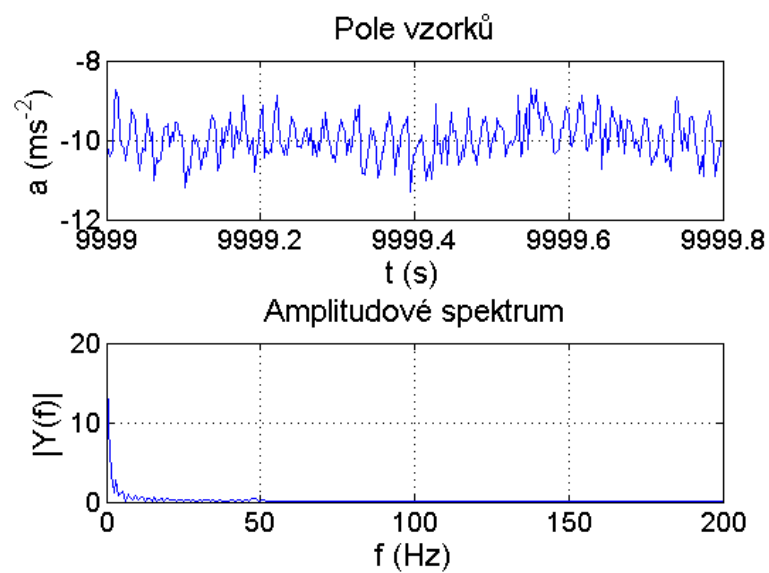


(a) Vzorky 1 v ose Z

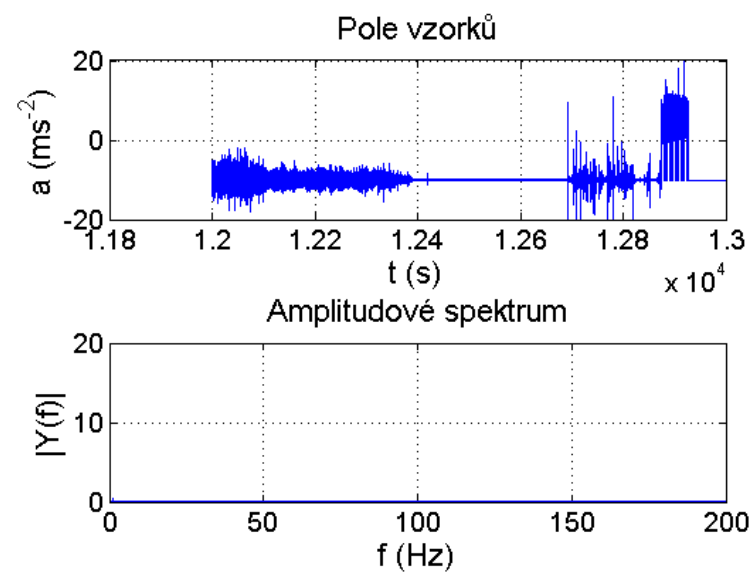


(b) Vzorky 2 v ose Z

Obr. B.8: Grafické průběhy a FFT pole vzorků



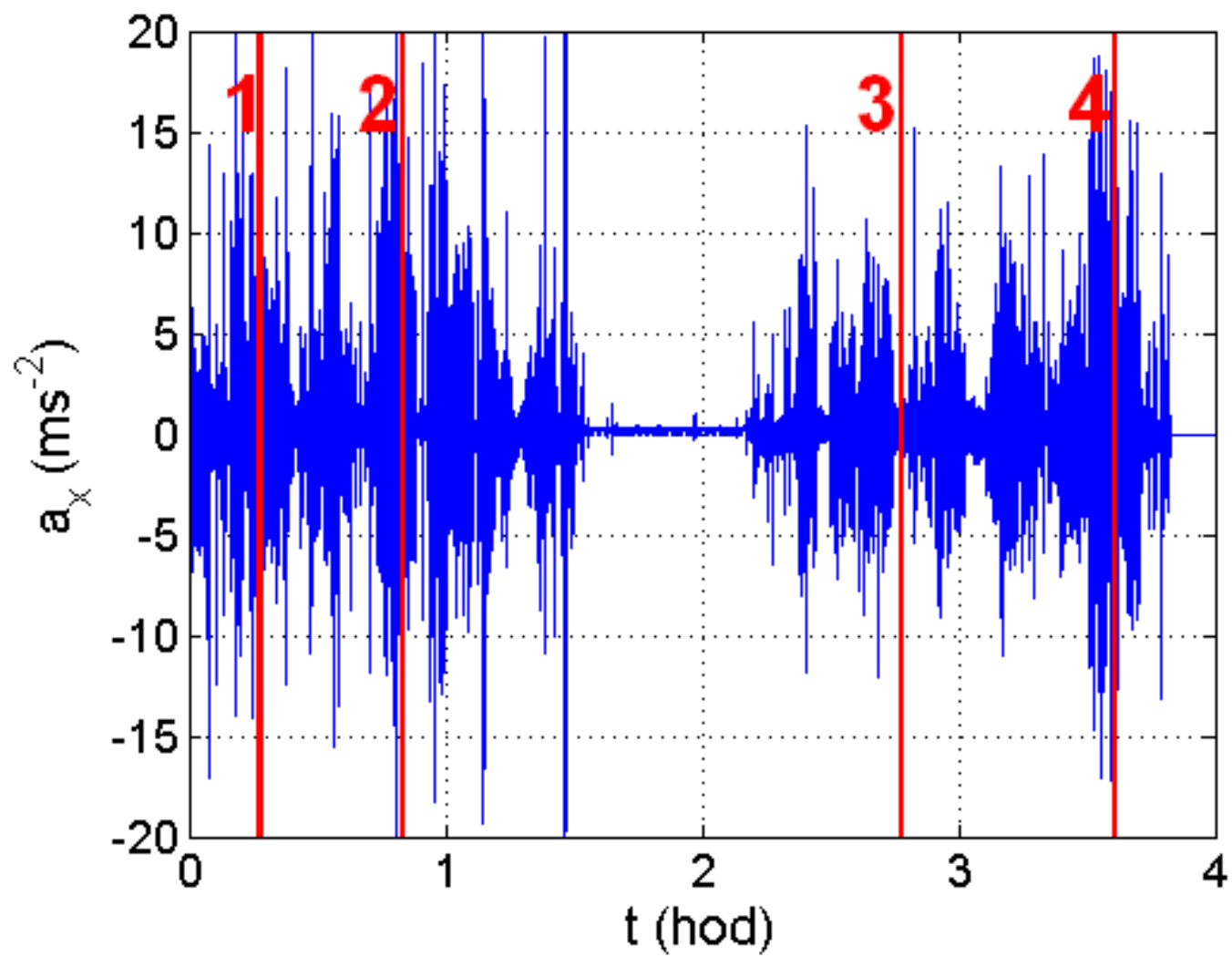
(a) Vzorky 3 v ose Z



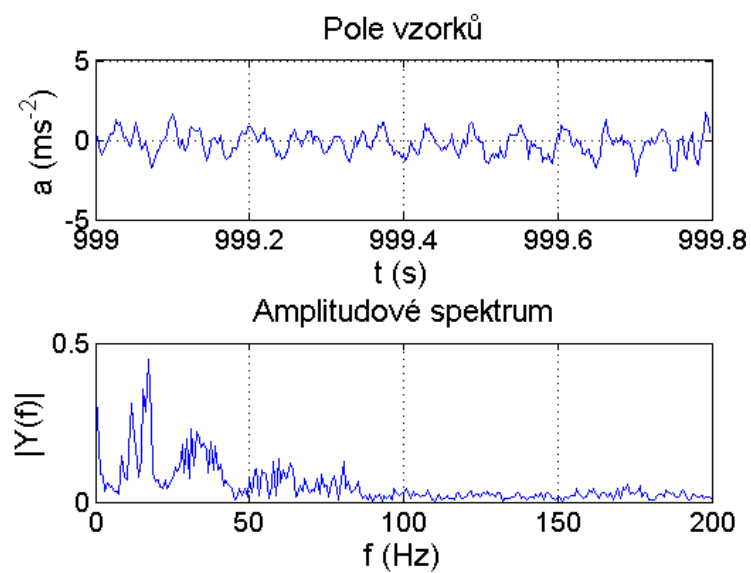
(b) Vzorky 4 v ose Z

Obr. B.9: Grafické průběhy a FFT pole vzorků

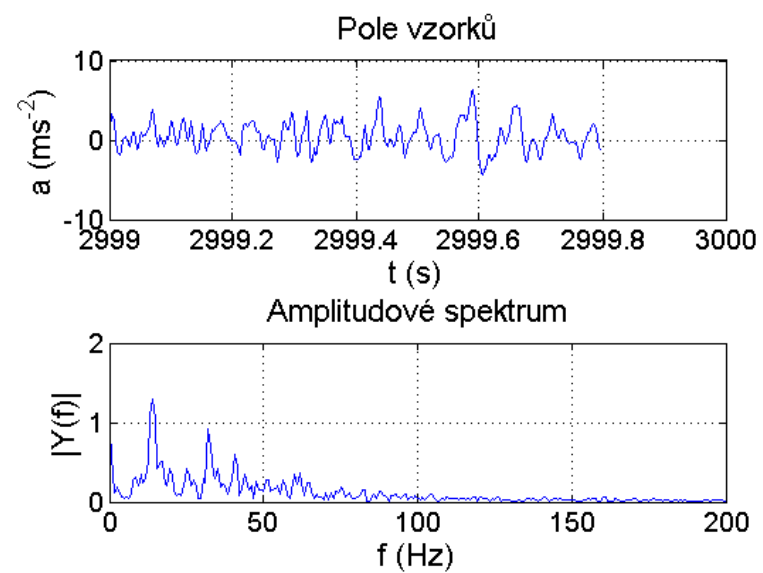
B.2 Autobus



Obr. B.10: Přehled profilu zrychlení v x-ové ose.

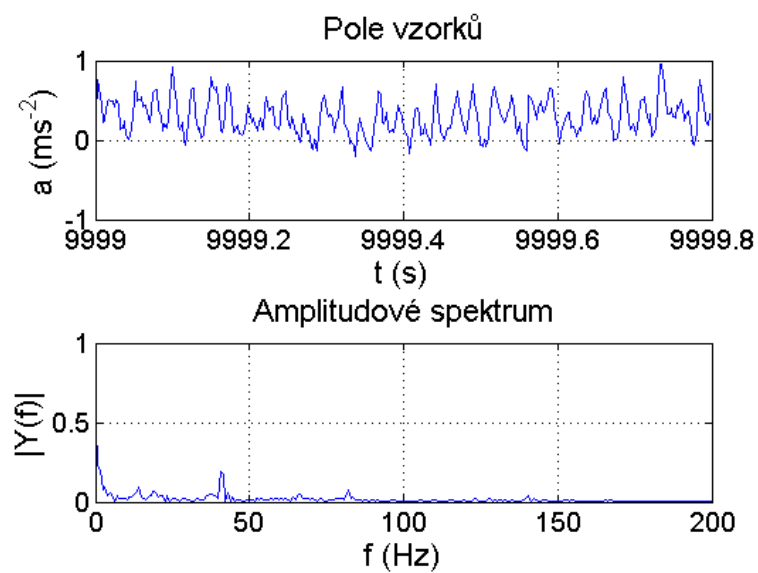


(a) Vzorky 1 v ose X

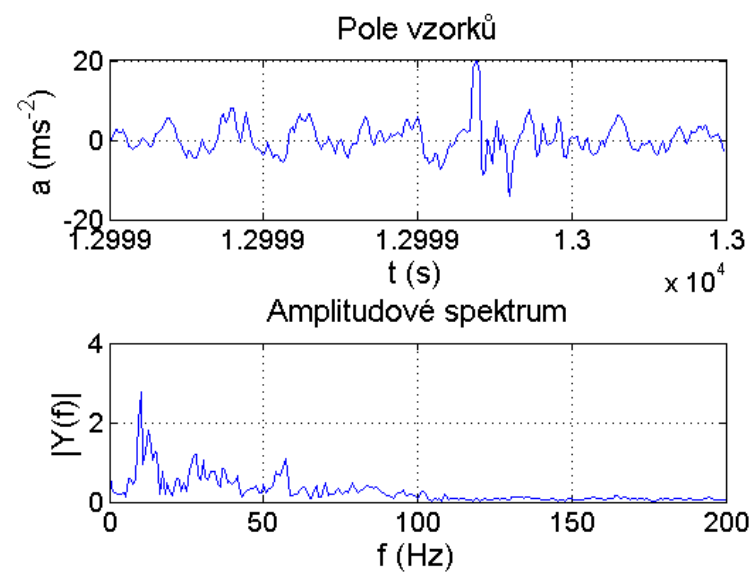


(b) Vzorky 2 v ose X

Obr. B.11: Grafické průběhy a FFT pole vzorků

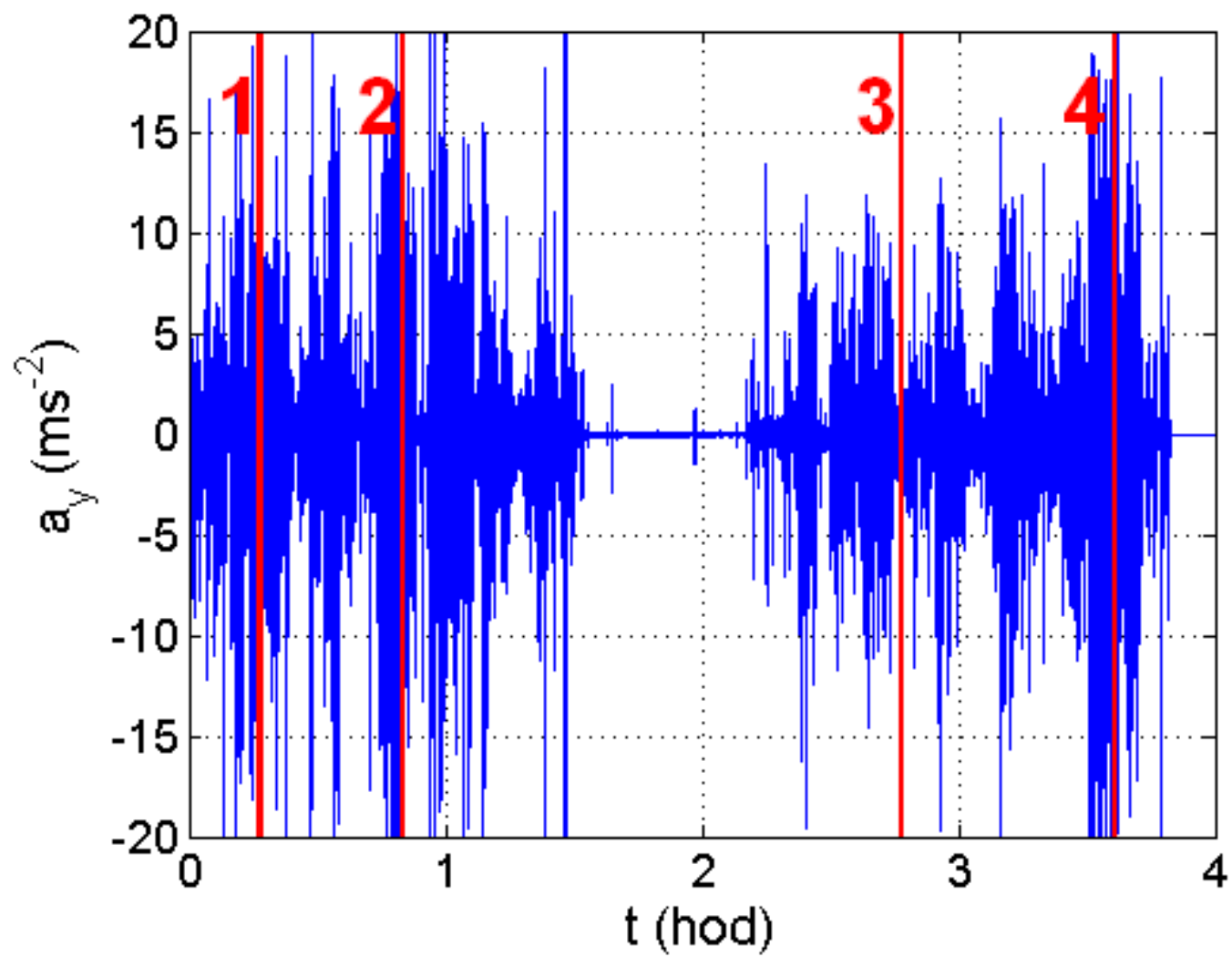


(a) Vzorky 3 v ose X

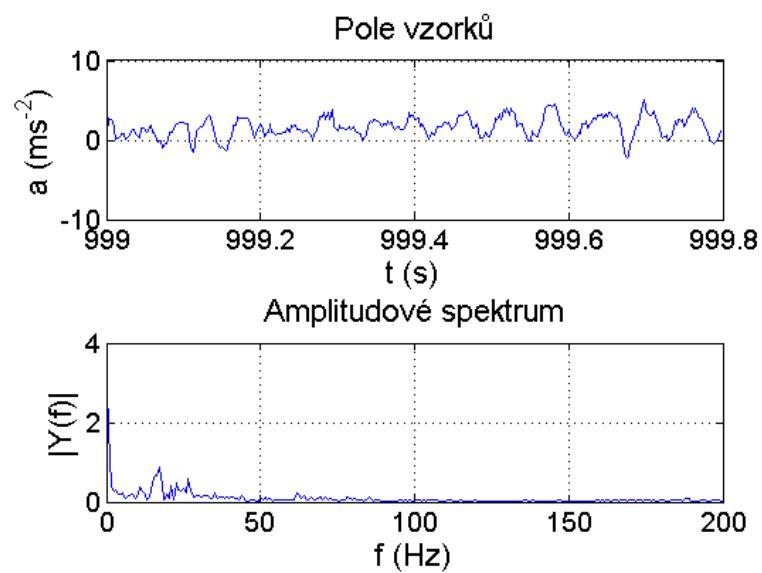


(b) Vzorky 4 v ose X

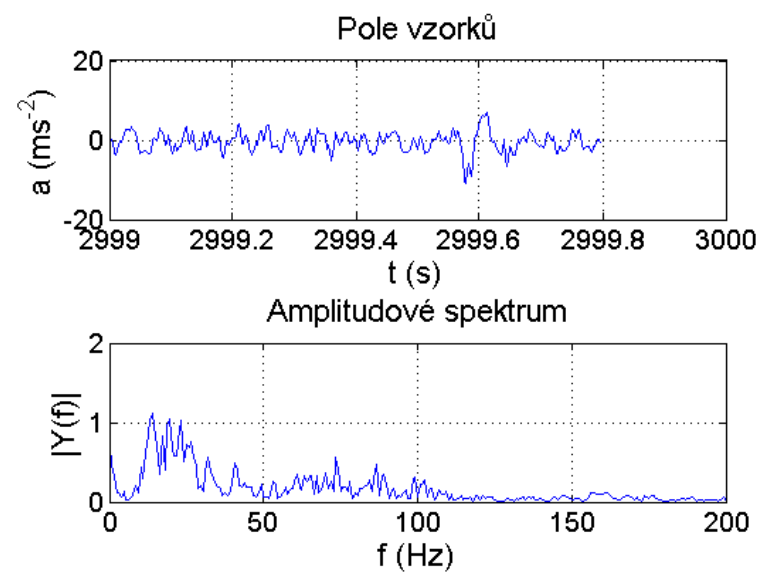
Obr. B.12: Grafické průběhy a FFT pole vzorků



Obr. B.13: Přehled profilu zrychlení v y-ové ose.

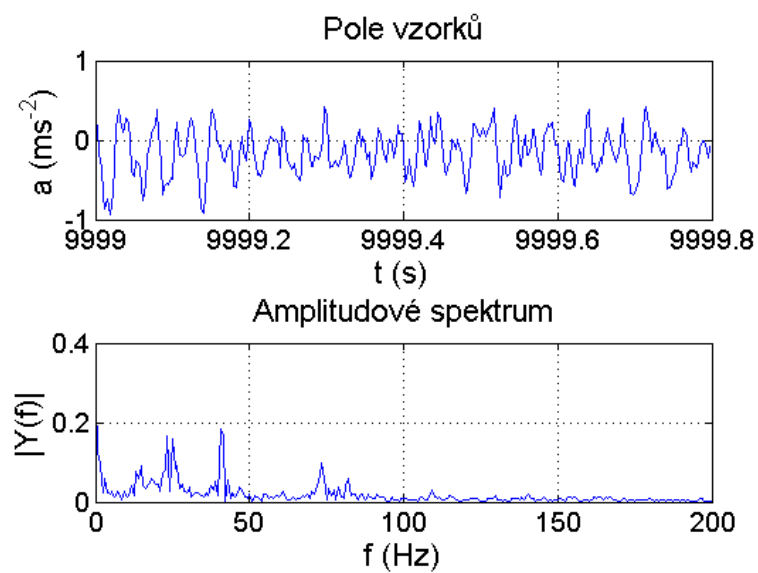


(a) Vzorky 1 v ose Y

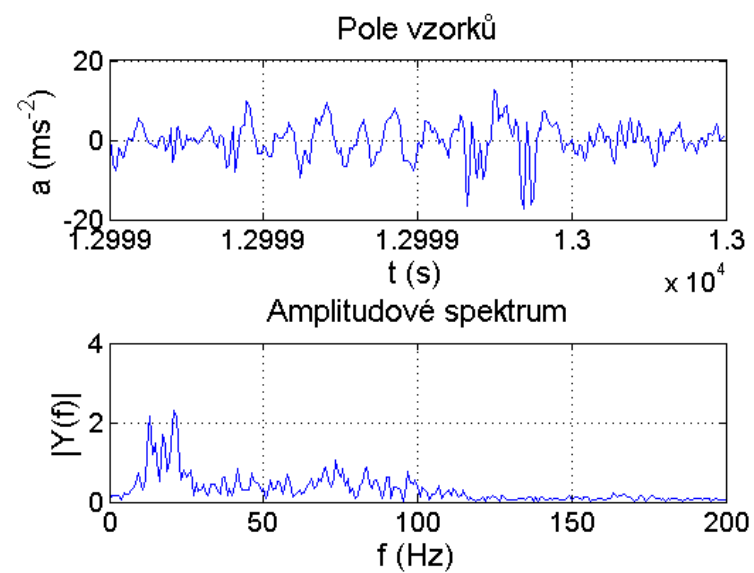


(b) Vzorky 2 v ose Y

Obr. B.14: Grafické průběhy a FFT pole vzorků

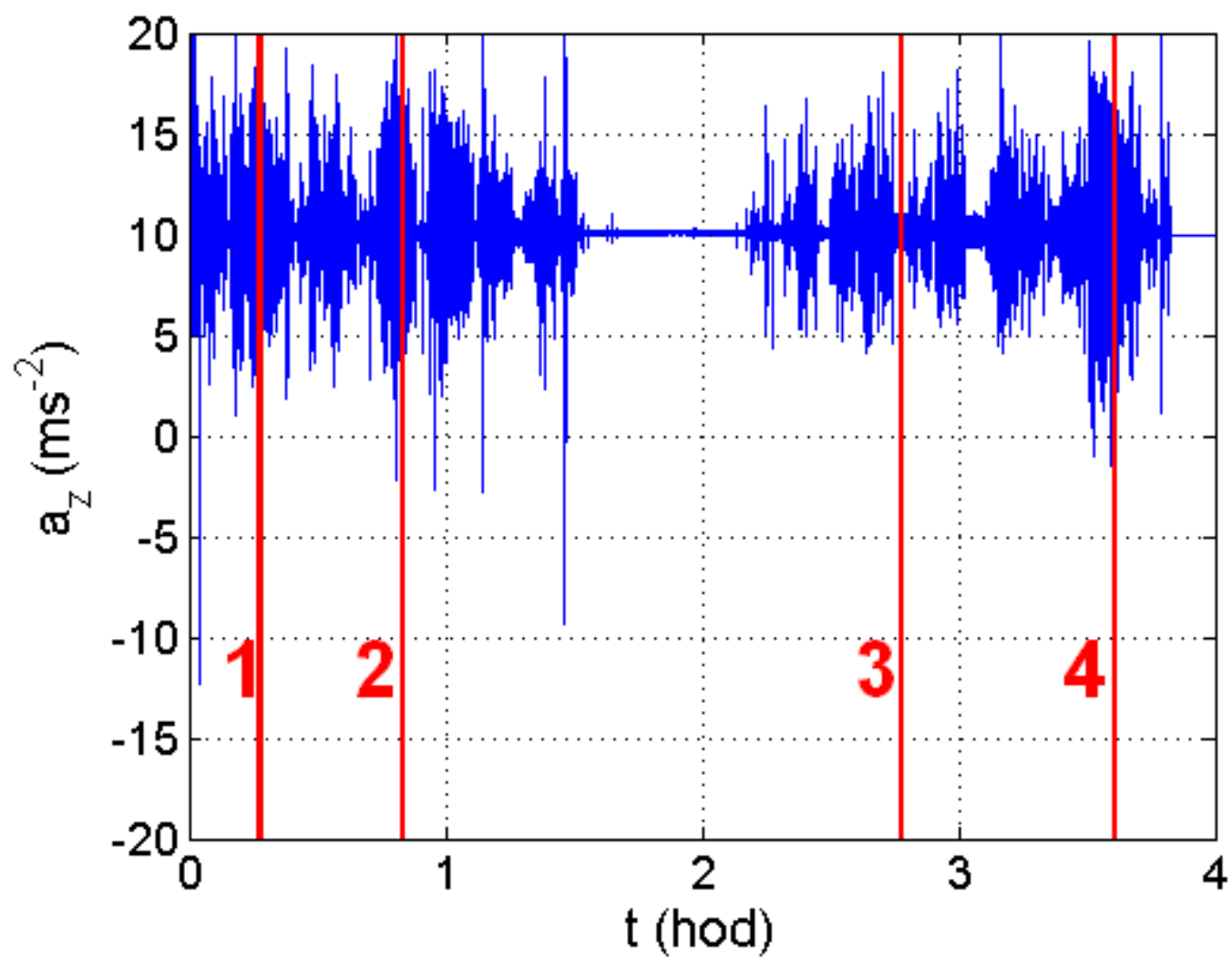


(a) Vzorky 3 v ose Y

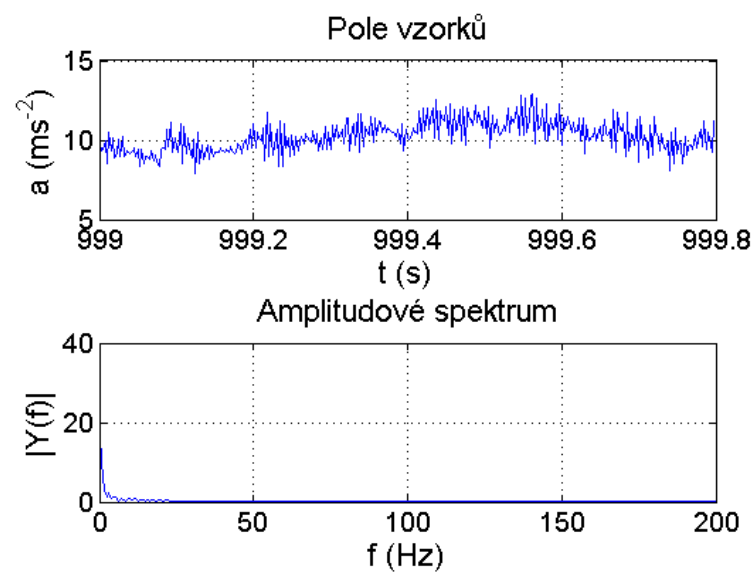


(b) Vzorky 4 v ose Y

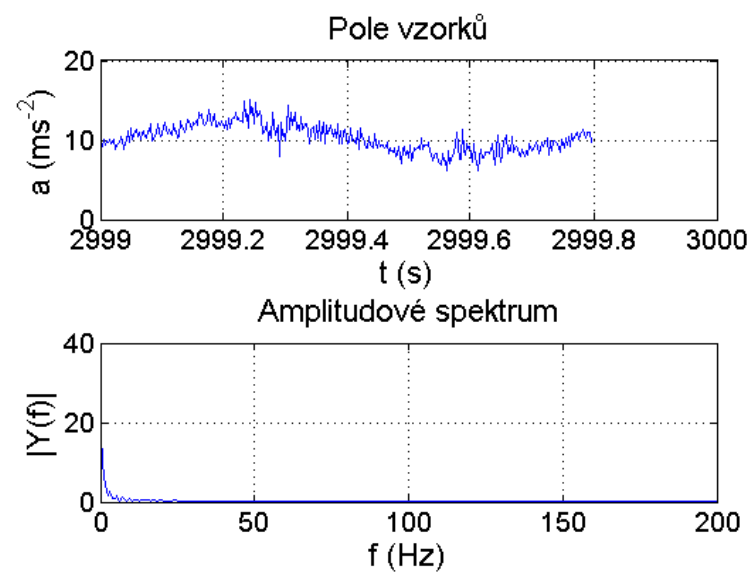
Obr. B.15: Grafické průběhy a FFT pole vzorků



Obr. B.16: Přehled profilu zrychlení v z-ové ose.

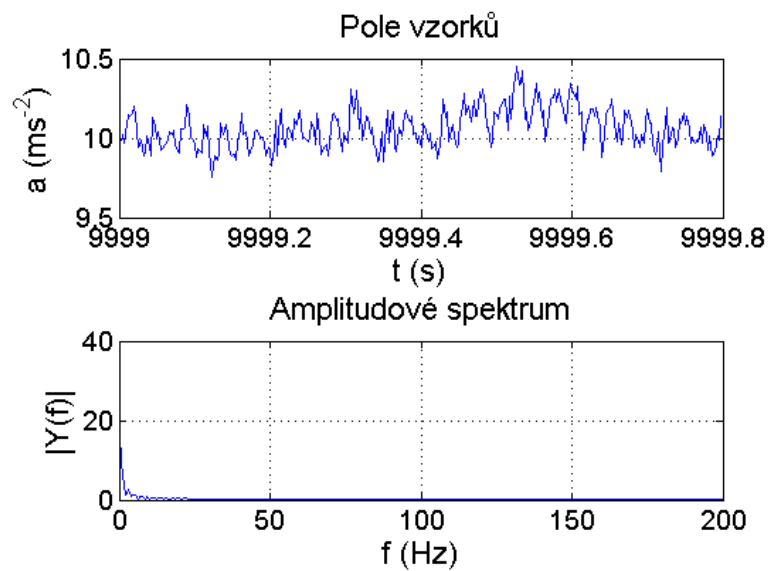


(a) Vzorky 1 v ose Z

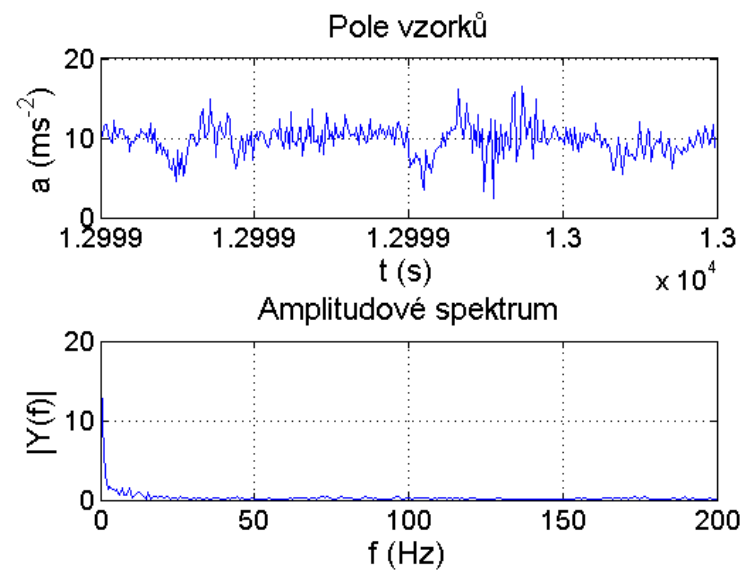


(b) Vzorky 2 v ose Z

Obr. B.17: Grafické průběhy a FFT pole vzorků



(a) Vzorky 3 v ose Z



(b) Vzorky 4 v ose Z

Obr. B.18: Grafické průběhy a FFT pole vzorků